

**Tuomo Viitala**

**Jatkuvatoiminen kunnonvalvonta**

**Case: Topi-Keittiöt Oy**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Huhtikuu 2018**

## TIIVISTELMÄ

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Huhtikuu 2018	<b>Tekijä/tekijät</b> Tuomo Viitala
<b>Koulutusohjelma</b> Sähkötekniikka		
<b>Työn nimi</b> Jatkuvatoiminen kunnonvalvonta Case: Topi-keittiöt Oy		
<b>Työn ohjaaja</b> Hannu Puomio		<b>Sivumäärä</b> 48+5
<b>Työelämäohjaaja</b> Iiro Ojala		
<p>Työ tehtiin Topi-Keittiöt Oy:lle osana Centria ammattikorkeakoulu Oy:n Teollinen internet liiketoiminnan tukena -hanketta. Tavoitteena oli kehittää mittalaitteisto puruimurin jatkuvatoimiseen kunnonseurantaan. Aluksi perehdyttiin kunnonvalvonnan periaatteisiin ja anturointiin. Sitten valittiin sopivat tavat toteutukseen ja rakennettiin laite testausta varten.</p> <p>Laitteisto asennettiin Topi-keittiöiden tehtaalle, jossa suoritettiin puruimurin kunnonvalvontaa. Osa käytetyistä antureista ei toiminut tarkoitukseen sopivalla tavalla, ja mittaustulosten perusteella päädyttiin hylkäämään joitakin testivaiheeseen valituista antureista. Perinteisemmät anturit todettiin käyttökelpoisiksi. Käytetyn tekniikan vaatimaa vertailudataa ei saatu kerättyä näin lyhyellä testijaksolla, mikä olisi ollut oleellista kokonais kuvan hahmottamiseksi.</p>		
<b>Asiasanat</b> datankeruu, kunnonvalvonta, sensoriverkot, teollinen internet.		

## ABSTRACT

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> April 2018	<b>Author</b> Tuomo Viitala
<b>Degree programme</b>		
<b>Name of thesis</b> Continuous condition monitoring Case: Topi-keittiöt Oy		
<b>Instructor</b> Hannu Puomio		<b>Pages</b> 48+5
<b>Supervisor</b> Iiro Ojala		
<p>The Thesis was made for Topi-Keittiöt Oy as part of a project called “Teollinen internet liiketoiminnan tukena” run by Centria University of Applied Sciences. The aim was to develop a measuring system for continuous condition monitoring of a wood powder extractor. First, the principles of condition monitoring and sensing were studied. Then suitable methods were chosen for the implementation and the device was constructed for testing. The equipment was installed at the factory of Topi-keittiöt, where the condition monitoring of the wood powder extractor was carried out.</p> <p>Some of the used sensors did not work appropriately. Thus, based on the measurements some of the sensors were discarded. More conventional sensors were found to be working. The reference data required for the used technology could not be collected in such a short test period. However, It would have been essential for gaining an overall view.</p>		

<b>Key words</b> condition monitoring. datalogging, industrial internet, sensor networks.
--

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 KUNNONVALVONNAN MITTAUKSET .....</b>	<b>2</b>
2.1 Kunnonvalvonta .....	2
2.2 Mittausmenetelmät .....	3
2.3 Mitattava kohde .....	7
2.4 Mittausmenetelmän valinta.....	10
<b>3 MITTAUSLAITTEISTO .....</b>	<b>12</b>
3.1 Tiedonkeruu ja anturit .....	12
3.2 Rakentaminen.....	29
3.3 Laitteiston testaus.....	32
<b>4 KÄYTÄNNÖN TESTIT .....</b>	<b>35</b>
4.1 Topi-Keittiöiden puruimuriasennukset .....	35
4.2 Muutokset .....	39
4.3 Laitteiston kustannukset .....	40
4.4 Tulokset.....	41
<b>5 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT .....</b>	<b>44</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>46</b>
 <b>KUVIOT</b>	
KUVIO 1. Kunnonvalvonta on osa kunnossapitoa .....	2
KUVIO 2. Jousi-massasysteemin värähtely.....	3
KUVIO 3. Värähtelymittauksille tyypillisiä taajuusalueita .....	4
KUVIO 4. Pyörrevirta-anturin toimintaperiaate .....	4
KUVIO 5. Nopeusanturin periaatekuva.....	5
KUVIO 6. Piettosähköisen anturin rakenne .....	5
KUVIO 7. Moottorin virtakomponentit .....	7
KUVIO 8. Raspberry Pi 3 I/O-liittimen pinnijärjestys ja toiminnot.....	13
KUVIO 9. Jännitealuetta on laajennettu vastuksilla .....	14
KUVIO 10. Kiihtyvyysanturin lohkokaavio .....	15
KUVIO 11. Kiihtyvyysanturin mekaanisen toiminnan periaate .....	16
KUVIO 12. Kiihtyvyysanturille suunnitellun liitäntäkortin kytkentäkaavio.....	17
KUVIO 13. WIKA TF45 PT100 lämpötila-anturin mitat.....	17
KUVIO 14. DS18B20 lämpötila-anturin kytkentä .....	19
KUVIO 15. Virta-jännitemuunnoksessa resistanssiin vaikuttavat A/D-muuntimen vastukset. ....	21
KUVIO 16. Säädetty virtalähde virtamittareiden kalibrointiin. ....	23
KUVIO 17. Virtamittarien lähtöjännitteet suhteessa mitattavaan virtaan. ....	24
KUVIO 18. Interlink FSR408 mitat.....	25
KUVIO 19. Spectra Sensor FS anturin mitat.....	25
KUVIO 20. Liuskan taivutuksen vaikutus resistanssiin .....	26

KUVIO 21. Lineaaripotentiometrin periaatekaavio.....	26
KUVIO 22. Lineaaripotentiometri.....	27
KUVIO 23. Esimerkkikytkentöjä puskurivahvistimeksi .....	27
KUVIO 24. Paineanturivahvistimen yhden kanavan kytkentäkaavio. ....	28
KUVIO 25. Paineanturivahvistimen jännitteensyöttöön suunniteltiin 5V vakavointikytkentä.....	29
KUVIO 26. Paineanturivahvistimen osasijoittelukuva.....	29
KUVIO 27. Testauslaitteiston kaavio.....	30
KUVIO 28. Mittalaitteen lohkokaavio.....	32
KUVIO 29. Testi 1:n tulokset.....	33
KUVIO 30. Testi 2:n tulokset.....	34
KUVIO 31. Periaatekuva Topi-keittiöiden puruimurin rakenteesta ja anturoinnista. ....	35
KUVIO 32. Puruimurin mittausdataa tietokannasta .....	42
KUVIO 33. Puruimurin mittausdataa web-käyttöliittymästä tarkasteltuna .....	43

## KUVAT

KUVA 1. Purunpoistojärjestelmä Topi-keittiöiden tehtaalla.....	8
KUVA 2. Mittauskohteeksi valittu päämuri imupuolelta katsottuna.....	9
KUVA 3. Päämuri takapuolelta katsottuna.....	9
KUVA 4. Raspberry Pi 3 model B.....	12
KUVA 5. Raspberry Pi:n voidaan lisätä analogisia tuloja A/D-kortilla.....	14
KUVA 6. Analog Devices ADIS16227 kiihtyvyysanturi.....	15
KUVA 7. Anturille valmistettiin alumiinista kotelo.....	16
KUVA 8. vahvistinkortti PT100-anturille.....	18
KUVA 9. MAX31865-kortit asennettuna.....	18
KUVA 10. Phoenix Contact PACT RCP-4000A virtamuuntaja.....	20
KUVA 11. Tyypikilvestä nähdään moottorin nimellisarvot.....	21
KUVA 12. Virranmittauksen testausasetelma.....	23
KUVA 13. Interlink FSR408 paineanturinauhaa.....	24
KUVA 14. Spectra Sensor FS anturi ala- ja yläpuolelta.....	25
KUVA 15. Anturit kiinnitettynä laitteeseen testaamista varten.....	31
KUVA 16. Mittalaite.....	31
KUVA 17. Kiihtyvyysanturi ja laakereiden lämpötila-anturit.....	36
KUVA 18. Moottorin lämpötila-anturit.....	36
KUVA 19. Paineanturinauhaa imurin kaavussa.....	37
KUVA 20. Virranmittausanturit moottorin turvakytkinkotelossa.....	37
KUVA 21. Mittalaitteet asennettuna Topi-keittiöiden purunpoistojärjestelmään.....	38
KUVA 22. Mittalaitteen varavirtalähdeyksikkö varustettiin kellokytkimellä.....	39

## TAULUKOT

TAULUKKO 1. Laitteiden hinnat .....	40
-------------------------------------	----

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään jatkuvatoimisen kunnonvalvontalaitteen kehittämistä purunpoistojärjestelmään Topi-keittiöt Oy:n keittiökalustetehtaalla. Työ tehdään osana Centria ammattikorkeakoulun Teollinen Internet Liiketoiminnan Tukena-hanketta (TILT) ja työn tuloksia voidaan hyödyntää myös Centrian tulevilla tarpeilla. Opinnäytetyö on rajattu mittalaitteiston kehittämiseen ja asentamiseen, mutta kokonaisuus sisältää myös mittaustiedon siirron tietokantaan ja tiedon analysoinnin myöhemässä vaiheessa, joihin työssä ei syvennyttä.

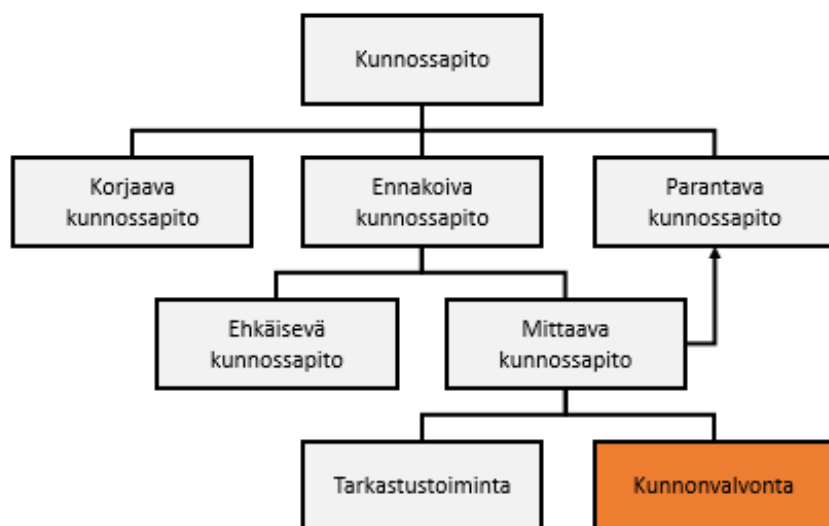
Kyseessä oleva purunpoistojärjestelmä koostuu mm. moottorista ja sen pyörittämästä puruimurista. Ongelmana on laitteessa ilmenevä kuluminen ja siitä aiheutuva särkyminen ja tuotannon seisokki. Tarkoituksena on kehittää laitteisto, jolla voidaan ennakoida särkyminen mittaamalla eri komponenttien ominaisuuksia jatkuvatoimisesti.

## 2 KUNNONVALVONNAN MITTAUKSET

Seuraavassa luvussa kuvataan lyhyesti, mitä kunnonvalvonta on, perehdytään erilaisiin mittaustekniikoihin, sekä tämän työn kohteena olevaan purunpoistolaitteistoon.

### 2.1 Kunnonvalvonta

Kunnonvalvonta on osa kunnossapitoa (KUVIO 1), jossa erilaisia mittausmenetelmiä ja analyysyjä hyödyntämällä määritellään laitteiston kunto käynnin aikana. Koneen vikaantuminen ja jäljellä oleva toiminta-aika pyritään ennakoimaan mittausten avulla. Näin huolto voidaan tehdä sopivaan aikaan ja siihen voidaan varautua. Mittauksia voidaan suorittaa säännöllisesti määrävälein tai jatkuvatoimisesti. Määrävälein suoritettava ns. Off-line mittaus tehdään yleensä kannettavalla mittarilla. Työntekijä käy mittaamassa koneista tietyt ennalta määritetyt pisteet, esimerkiksi laakerien värähtelyn ja tallentaa tiedot mittalaitteen muistiin. Koneen valmistaja on määritellyt raja-arvot normaalille toiminnalle, joihin mitattuja arvoja verrataan. Jatkuvatoimisessa On-line mittauksessa koneisiin on asennettu kiinteät anturit. Antureilta saatava tieto voidaan siirtää keskitettyyn tietojärjestelmään analysoitavaksi. (MIP Electronics Oy.)



KUVIO 1. Kunnonvalvonta on osa kunnossapitoa (mukaillen ABB 2000, 597)

Kunnonvalvontaa suoritetaan mittaamalla valvottavasta koneesta fysikaalisia suureita koneen käynnin aikana. Mitattavia suureita voivat olla mm. värähtely, lämpötila, sähkövirta, paine, virtaus, käyntinopeus

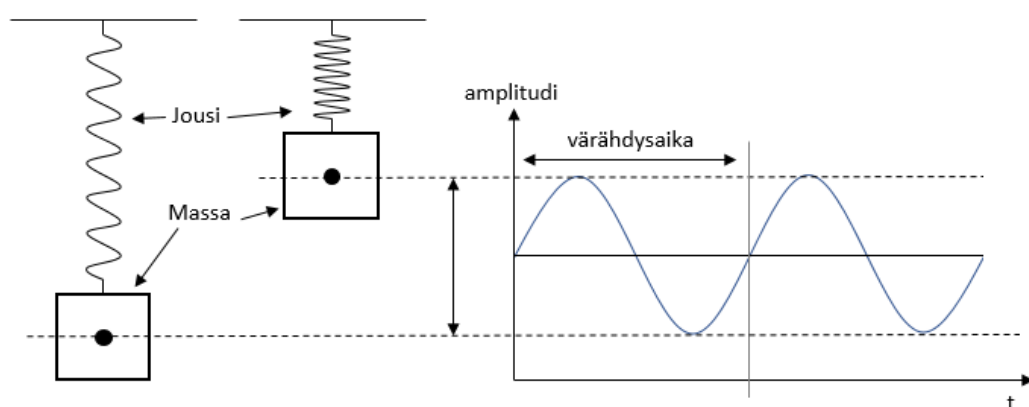
ja muut prosessisuureet. Usean suureen mittaus rinnakkain eli ns. moniparametrivalvonta antaa luotettavamman tuloksen yksittäisen suureen seurantaan nähden. (ABB 2000, 599.)

## 2.2 Mittausmenetelmät

Kunnonvalvonnassa suureiden mittaamiseen on useita eri vaihtoehtoisia tekniikoita. Kulloinkin parhaiten sopiva menetelmä riippuu monesta tekijästä: laitteen kriittisyys tuotannon kannalta, todennäköiset viat ja niiden kehittymisen nopeus, käyttöympäristö, mittauspisteiden lukumäärä ja mittauksiin käytettävissä olevat investoinnit ja niin edelleen. (Mikkonen, Miettinen & Jantunen 2009, 223)

### Värähtelymittaukset

Mikään laite tai materiaali ei ole täysin jäykkä, joten värähdellessään ne käyttäytyvät kuviossa 2 esitetyn jousi-massasysteemin tavoin. Pyörivissä koneissa värähtelyä voi aiheuttaa epätasapaino akselissa tai kuluminen aiheuttamat vauriot. Värähtelyn mittauspiste on kuitenkin koneen kiinteässä rakenteessa kuten rungossa, sillä liikkuvasta osasta mittaus on yleensä mahdotonta. Paras mittauspaikka on yleensä mahdollisimman lähellä laakeria, sillä värähtely johtuu runkoon sen kautta. (ABB 2000, 602.)

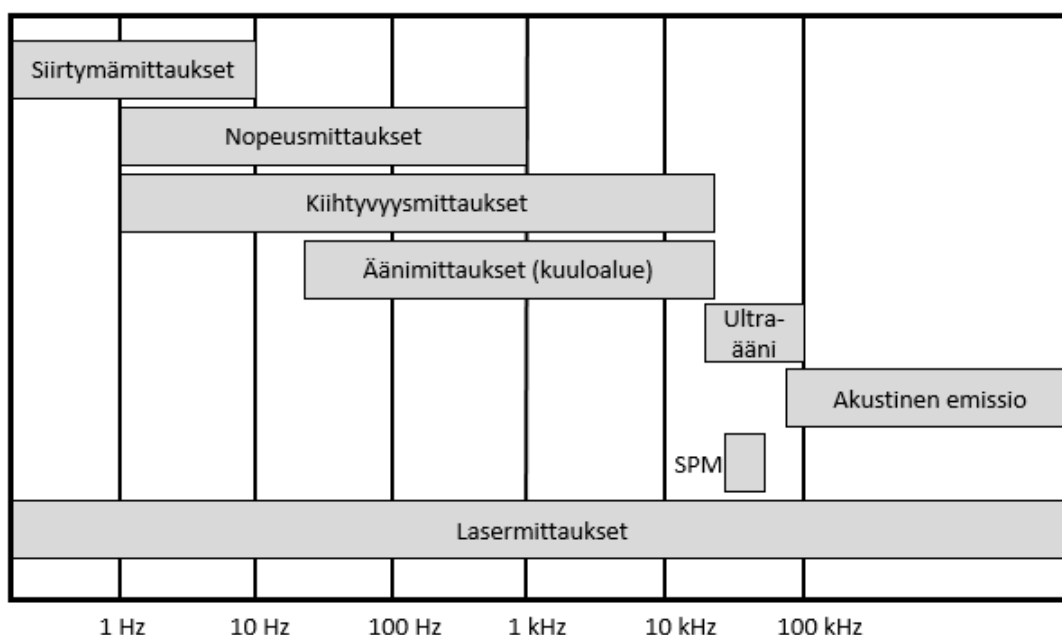


KUVIO 2. Jousi-massasysteemin värähtely (mukaillen ABB 2000, 602)

Värähtelymittausta pidetään tehokkaimpana kunnonvalvonnan menetelmänä arvioitaessa laakerin kuntoa, epätasapainoa tai muita koneen osiin kohdistuvia voimia. Mittaaminen tehdään yleensä tiedonkeruulaitteella tai analyysaattorilla, josta kerätty data puretaan myöhemmin tietokoneelle analysoitavaksi. Värähtelymittauksien suorittamiseen on useita eri tapoja. (ABB 2000, 600.)

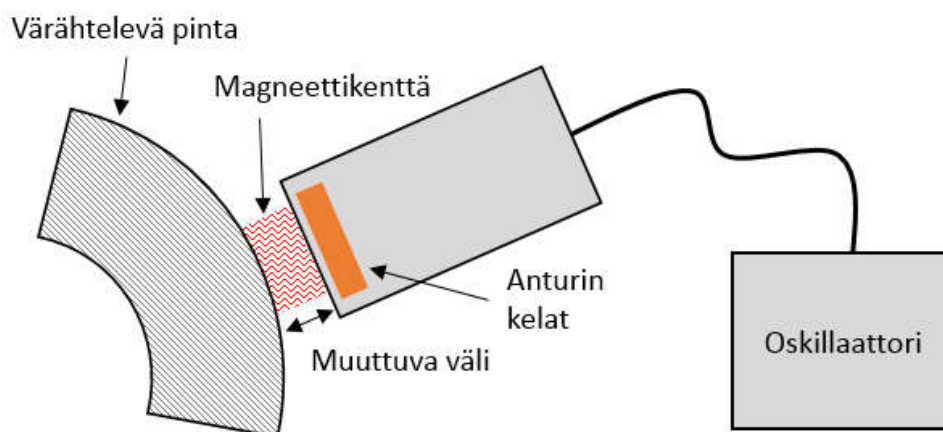


Värähtelymittaukset kattavat taajuusalueet suunnilleen kuvion 3 mukaisesti käytettävästä tekniikasta riippuen. Kuviossa mainittu SPM tarkoittaa iskusysäysmenetelmää. (ABB 2000, 605.)



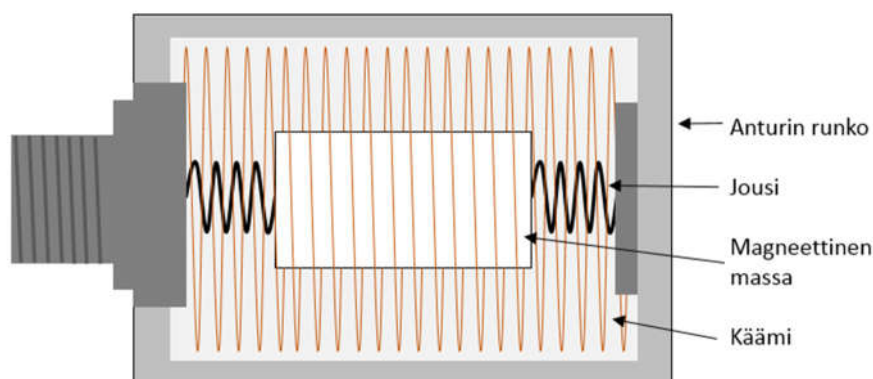
KUVIO 3. Värähtelymittauksille tyypillisiä taajuusalueita (mukaillen ABB 2000, 606)

*Siirtymämittauksia* suoritetaan yleensä pyörrevirta-antureilla (KUVIO 4). Anturin toiminta perustuu vaihtovirtapiirissä olevaan kelaan. Vaihtuva magneettikenttä aiheuttaa kellarungon läheisyydessä olevaan johtavaan kappaleeseen pyörrevirtoja, jotka muuttavat vaihtovirtapiirin impedanssia. Tästä seuraa, että kelan jännite on kohteen etäisyydestä riippuvainen. Pyörrevirta-anturin hyvä puoli on, että sitä ei tarvitse kiinnittää mitattavaan kohteeseen, vaan se toimii kosketuksettomasti. Taajuusvaste ulottuu hyvin alas. (ABB 2000, 606.)



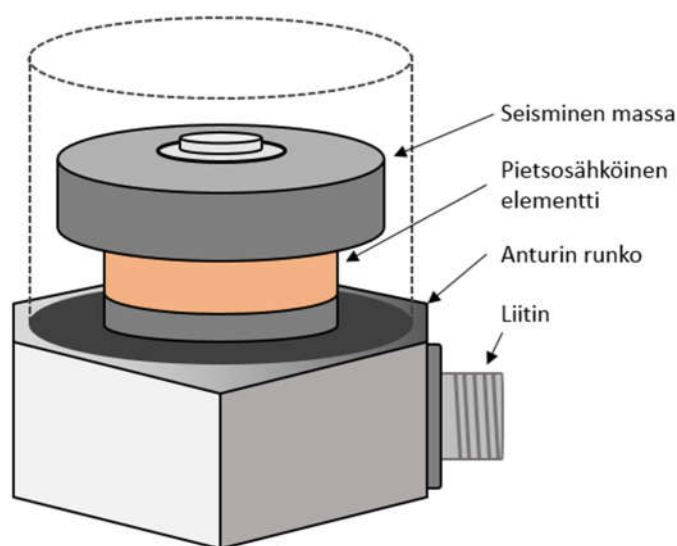
KUVIO 4. Pyörrevirta-anturin toimintaperiaate (mukaillen Mikkonen 2009, 235)

*Nopeusmittauksia* suoritetaan nopeusanturilla. Nopeusanturi on kookas. Sen toiminta perustuu käämiin, jonka sisällä on magneettisydän kuvion 5 mukaisesti. Värähtelyn aiheuttama magneetin liike muodostaa kelan napoihin nopeuteen verrannollisen jännitteen. Anturin taajuusvaste on kapea. (ABB 2000, 606.)



KUVIO 5. Nopeusanturin periaatekuva (mukaillen Mikkonen 2009, 237)

*Kiihtyvyyssmittauksia* varten on olemassa erilaisia kiihtyvyyssantureita. Yleisimmät kiihtyvyyssanturit perustuvat pietsosähköiseen kiteeseen joka on kiinnitetty anturin rungon ja ns. seismisen massan väliin (KUVIO 6). Liikkuessaan massa aiheuttaa kiteeseen varauksen joka on suoraan verrannollinen kiihtyvyyteen. Pietsosähköiset anturit ovat kooltaan pieniä ja taajuusvaste voi olla suhteellisen laaja. Ylärajataajuuden määrä anturin resonanssitaajuus ja tällä taajuudella kiinnityksen merkitys korostuu. Kiihtyvyyttä voidaan mitata myös venymäliuska- tai induktiivisilla antureilla, mutta taajuusvaste jää silloin selkeästi kapeammaksi. (ABB 2000, 606.)



KUVIO 6. Pietsosähköisen anturin rakenne (mukaillen Mikkonen 2009, 238)

*Ääntä* mitataan yleensä mikrofonilla, ja signaali tallennetaan myöhempää analysointia varten. Yleensä mitataan käyttöympäristön melua, josta vikaantuvien laitteiden ääniä etsitään. Laakerivikojen paikantamiseen käytetään myös sähköistä stetoskooppia. *Ultraäänialue* soveltuu hyvin laakereiden kunnan arviointiin, sillä yli 20kHz taajuusalueella muita häiriöääniä ei juuri ole. (ABB 2000, 606.)

*Akustisen emission* taajuusalue on hyvin laaja ja ulottuu korkealle, 40 kHz – 10 MHz. Anturina käytetään yleensä pietsosähköistä kidettä, mutta toisin kuin kiihtyvyysanturissa, ilman lisämassaa. Korkeat taajuudet vaimenevat tehokkaasti kaikissa rajapinnoissa, ja siksi anturin kiinnitys onkin haastavaa. Tällä tekniikalla on kuitenkin mahdollista ennakoida laakerin särkymistä jo hyvin varhaisessa vaiheessa, sillä jo pienet säröt metallin pinnalla aiheuttavat värähtelyä korkeilla taajuuksilla ennen kuin varsinaista vauriota ehtii syntyä. (ABB 2000, 606.)

*Iskusysäysmenetelmä* (SPM, Shock Pulse Method) käytetään laakereiden kunnonvalvonnassa. Menetelmä perustuu kiihtyvyysanturiin, jonka resonanssitaajuus on viritetty 32 kilohertsiin. Esimerkiksi viallinen laakeri aiheuttaa iskusysäyksiä, jotka herättävät anturin resonanssin. Resonanssin voimakkuus on verrannollinen iskusysäyksen voimakkuuteen, josta voidaan päätellä laakerin kunto. (ABB 2000, 607.)

*Laserinterferometria* perustuu mitattavasta kohteesta heijastuvan lasersäteen ja vertailusäteen keskinäisvaikutukseen eli interferenssiin. Mittalaitteet ovat monikäyttöisiä eivätkä vaadi fyysistä kontaktia mitattavaan kohteeseen. Taajuuskaista on laaja ja ulottuu korkealle, satoihin kilohertzeihin. (ABB 2000, 607.)

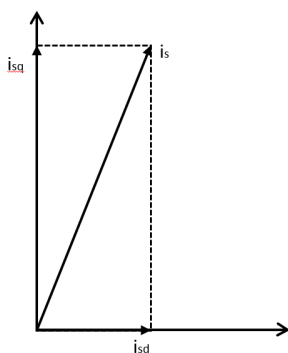
## **Lämpötila**

Lämpötilan kohoaminen kertoo kasvavasta kitkasta, joka voi johtua mm. vauriosta tai voiteluaineen puutteesta. Yleensä siinä vaiheessa, kun kone lämpenee, on aikaa huoltotoimien valmisteluun vähän. (ABB 2000, 600.)

Mitattaessa moottorin lämpötilaa kiinteällä mittausjärjestelmällä, lämpötila-anturit voivat olla jo valmistusvaiheessa moottorin käämitykseen, laakereihin tai jäähdytysilmaan asennettuja. Anturit pyritään sijoittamaan käämin kuumimpiin paikkoihin. Kannettavilla mitalaitteilla mitataan koneen pintalämpötilaa. Mikäli vertailudataa on käytettävissä, tälläkin menetelmällä laakeriviat ja käämien tai liitäntöjen viat voidaan havaita. (PSK 7712, 2000, 2.)

## Sähkövirta

Oikosulkumoottorin virta koostuu kahdesta komponentista: loisvirta ja pätövirta kuvion 7 mukaisesti. Loisvirtakomponenttiin sisältyy magnetointivirta, joka on vakiovualueella suunnilleen vakio. Moottorin nimellispisteessä loisvirta antaa melko hyvän arvion magnetointivirrasta. Pätövirta on momentin tuottava virtakomponentti. Kun moottorin momentti on nolla eli moottoria ei kuormiteta, myös pätövirtakomponentti on likimain nolla. (ABB 2001, 11.)



KUVIO 7. Moottorin virtakomponentit (mukaillen ABB 2001, 11)

Sähkömoottorin ottamasta virrasta voidaan tehdä spektrianalyysin avulla ns. roottorianalyysi. Yhdestä vaiheesta tehtävä mittausta on helppo järjestää vaihejohtimen ympärille laitettavan virtapihdin avulla, eikä johdinta tarvitse katkaista mittausta varten. Mitatun virran taajuusspektristä tarkastellaan linjataajuuden ympäristöä. Roottorin viat näkyvät sivunauhoina linjataajuuden molemmin puolin. (ABB 2000, 600.)

### 2.3 Mitattava kohde

Topi-keittiöiden tehtaalla keittiökalusteiden valmistamisessa syntyy jätteenä purua ja levyn palasia. Nämä johdetaan työstöasemilta imurien avulla tehtaan ulkopuolella sijaitsevaan purunpoistojärjestelmään (KUVA 1). Se koostuu useista siiloista, joista puru siirretään yhdellä jatkuvasti käyväällä imurilla varastoon.



KUVA 1. Purunpoistojärjestelmä Topi-keittiöiden tehtaalla.

Jatkuvatoimisen kunnonvalvontamittauksen kohteeksi otettiin viimeinen imuri, joka toimii jatkuvasti ja on oletettavasti kuluvin osa järjestelmää. Puruimuri rakentuu moottorista ja kaavullisesta keskipakopuhaltimesta. Puhaltimen akseli on laakeroitu koneen runkoon kahdesta pisteestä ja voimansiirto moottorilta on toteutettu hihnoilla. Vikaantuvia paikkoja ovat moottorin laakerit, hihnat, imurin akselin laakerit ja kotelo, joka lopulta kuluu puhki suurempien puunkappaleiden osuessa sen sisäpintaan. Koneen kunnonvalvonta on suoritettu tähän asti tarkkailemalla silmämääräisellä menetelmällä moottoria, vetohihnoja, laakereita ja imurin koteloa. Mittauskohteiksi valittiin moottori, imurin laakerit ja imurin kotelo, jotka näkyvät tarkemmin kuvissa 2 ja 3.



KUVA 2. Mittauskohteeksi valittu pääimuri imupuolelta katsottuna.



KUVA 3. Pääimuri takapuolelta katsottuna.

## 2.4 Mittausmenetelmän valinta

Moottorin ja laakereiden valvonta olisi mahdollista toteuttaa sopivilla kiihtyvyyssantureilla. Jatkuvatoimisena tämä tuottaisi kuitenkin suuren määrän analysoitavaa dataa, joten päätettiin käyttää useampia vaihtoehtoisia tekniikoita kunkin mittauspisteen vaatimusten mukaisesti. Näin voidaan vertailla eri mitaustekniikoiden soveltuvuutta ja valita niistä edullisimmat.

Yhtä imurin laakeria varten valittiin kiihtyvyyssanturi värähtelyn mittaamiseksi. Värähtelymittaus tehdään koneen rungosta laakeripukin vierestä, joten sillä voidaan todennäköisesti havaita muitakin koneesta johtuvia, matalataajuisempia värähtelyitä. Tarvittaessa antureita voidaan lisätä, mutta kiihtyvyyssanturi tuottaa suuren määrän dataa ja siksi niiden käyttö on rajattava vain tärkeimpiin pisteisiin. Molempiin laakereihin valittiin lämpötila-anturit ja moottoria varten kaksi lämpötila-anturia. Lämpötilan muutoksesta voidaan havaita ainakin vakavammat laakeriviat. Sen lisäksi moottorin virtaa mitataan kustakin vaihejohtimesta.

Käytännössä on havaittu, että puruimurin kotelo eli kaapu kuluu käytössä ja johtaa lopulta sen puhkeamiseen. Kulumisen mittaamiseen ei löytynyt valmiita ratkaisuita, joten siihen sovellettiin olemassa olevia antureita. Ennen puhkeamista materiaali on kulunut hyvin ohueksi ja oletettavasti pullistuu ulospäin. Kulumisen mittaamiseen on muutamia potentiaalisia vaihtoehtoja. Metallin vahvuutta voisi mitata esimerkiksi optisella tai ultraäänianturilla, mutta se toimisi vain pistemäisellä alueella. Koska kehän pituus on melko suuri, täytyy mittaukseen käytettävän komponentin olla pitkä. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää useita lyhyempiä komponentteja.

Venymäliuska antaa hyvin tarkan tiedon kappaleen pituuden muutoksesta tai taipumisesta. Venymäliuskat ovat useimmin suhteellisen lyhyitä, noin 1-2cm pitkiä. Puhaltimen kehän pituus on noin 1,5m. Mittaus niillä ei olisi kovin käytännöllistä, koska liuskoja tarvitaan silloin kymmeniä. Paineanturiliuskoja on saatavilla 50cm pituisina. Näiden käyttökelpoisuudesta ei ole varmuutta, mutta periaatteessa se voisi toimia. Nauha liimataan kaksipuolisella teipillä puhaltimen pintaa vasten. Silloin anturi voisi havaita pinnan muodossa tapahtuvan muutoksen.

Taipuma-anturiliuskat ovat yksi mahdollinen vaihtoehto, sillä ne mittaavat nimenomaan pinnan taipumista. Mittausalue on 0-90 astetta ja pituus vain 10cm. Viimeisenä vaihtoehtona on lineaaripotentimetri liitettynä puhaltimen ympäri kiertävään teräspantaan. Kun puhaltimen pinta venyy, panta vetää potentiometrin karaa, jolloin sen resistanssi muuttuu.

Kun mittauksia tehdään jatkuvatoimisesti, voidaan saatua dataa verrata aikaisempiin mittaustuloksiin. Tällöin antureiden ei tarvitse kyetä antamaan absoluuttisia tuloksia, mutta niiden täytyy pystyä antamaan toistettavia tuloksia. Koneen käydessä dataa kertyy aina vain pidemmältä ajalta ja poikkeamia voidaan havaita paremmin mitä enemmän vertailudataa on käytettävissä koneen normaalista toiminnasta. Antureiden arvoja ei lueta kovin suurella taajuudella vaan esimerkiksi lämpötilamittauksiin riittää, kun lämpötila mitataan esimerkiksi 1 minuutin välein. Poikkeuksena on kiihtyvyyssanturi, jonka toimintaperiaate jo edellyttää korkeaa mittaustaajuutta.

Mikäli moottorin virrasta halutaan analysoida esimerkiksi roottorin vikoja, pitäisi myös virtaa mitata korkealla taajuudella. Tässä tapauksessa siihen ei kuitenkaan ryhdytty, sillä se olisi edellyttänyt monimutkaisempia mittalaitteita ja datan määrä olisi kasvanut huomattavasti. Moottorin virta-arvot tallennetaan yhden minuutin välein. Näin karkeasta mittauksesta tuskin kuitenkaan voidaan tehdä kovin tarkkoja päätelmiä.



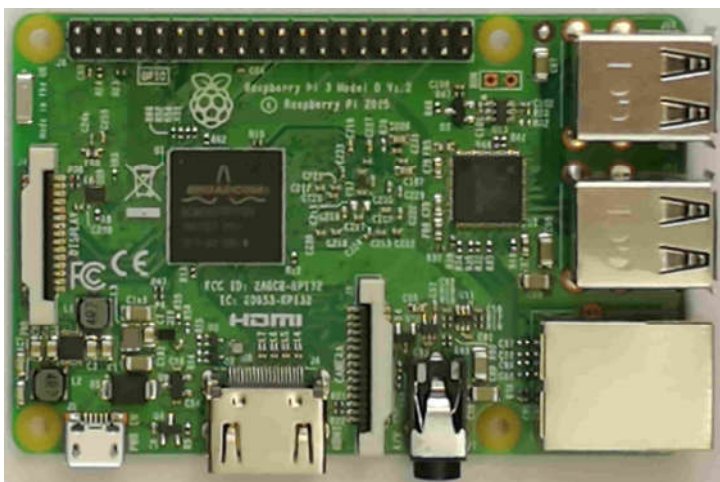
### 3 MITTAUSLAITTEISTO

Kunnonvalvonnan suorittamiseen suunniteltiin laite, johon mittauksiin tarvittavat anturit liitetään ja joka käsittelee antureilta saatavan tiedon, sekä siirtää mittatiedot langattomasti Topi-Keittiöiden tehtaalta Centrian palvelimelle.

#### 3.1 Tiedonkeruu ja anturit

Mittauslaitteisto rakentuu tietokoneen ympärille, johon liitetään tarvittavat anturit muuntimineen. Tietokoneeksi valittiin Raspberry Pi 3 model B. Sitä on käytetty mittaus-, ohjaus- ja muissa vastaavissa sovelluksissa Centrian kehityshankkeissa aikaisemminkin.

Kuvassa 4 oleva Raspberry Pi on pieni tietokone, jota voidaan käyttää perinteisen PC:n tapaan esimerkiksi internetin selaamisen, tekstin käsittelyyn tai teräväpiirtovideon toistamiseen. Siitä löytyy mm. USB- (Universal Serial Bus), HDMI- (High Definition Multimedia Interface), ja Ethernet-liittimet. Lisäksi siinä on, mallista riippuen, 26- tai 40-napainen I/O (Input/Output) -liitin, jossa on logiikkatasoisia I/O-pinnejä. Käytettävän Pi 3 version tapauksessa pinnejä on 40. Niihin voidaan liittää esimerkiksi antureita tai muuta oheiselektroniikkaa. Tämän takia sillä on helppo toteuttaa erilaisia mittaus- ja ohjaussovelluksia.























KUVA 4. Raspberry Pi 3 model B.

I/O-liittimen pinnit (KUVIO 8) ovat aseteltavissa melko vapaasti eri käyttötarkoitusta varten ja käytävissä on mm. UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), I<sup>2</sup>C (Inter Integrated Circuit bus) ja SPI (Serial Peripheral Interface bus) -väylät. Lisäksi siitä saadaan 5V ja 3,3V käyttöjännitteet pienille oheislaitteille, kuten antureille. Laitteen koko on varsin kompakti ja vastaa suurin piirtein luotokortin mittoja. Massamuistina Raspberry Pi käyttää SD muistikorttia. (Raspberry Pi foundation.)

Raspberry Pi:ssä myös käyttöjärjestelmä sijaitsee muistikortilla. Järjestelmä pitäisi aina sammuttaa hallitusti käyttöjärjestelmän kautta. Jos virransyöttö katkeaa muistin käsittelyn aikana, tästä voi aiheutua muistikortin korruptoituminen, jolloin toiminta ei enää jatku virransyötön palautuessa. Toisaalta jokin häiriö voi aiheuttaa järjestelmän jumitumisen, jolloin virta pitää hetkeksi katkaista järjestelmän uudelleenkäynnistämiseksi. Ongelman voidaan ratkaista UPS-HAT (Uninterruptible Power Supply Hardware Attached on Top) -moduulilla, eli varavirtakortilla, joka pienen akun avulla pystyy pitämään järjestelmän toiminnassa virtakatkoksen aikana ja sammuttaa Raspberry Pin hallitusti ennen akun tyhjentymistä. (ModMyPi.)

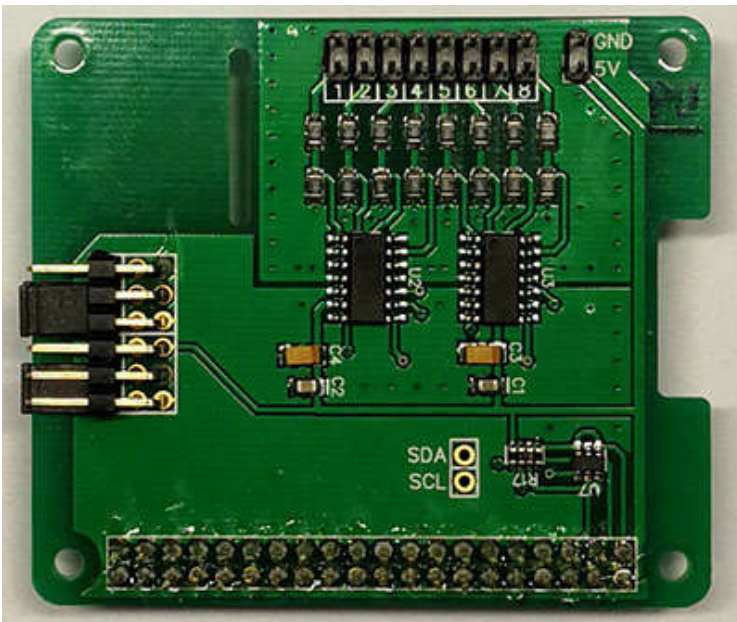
Saatavissa on erilaisia HAT-moduuleita, jotka liitetään I/O-liittimeen. Moduuleita voidaan kasata päällekkäin niin, että I/O-väylä kulkee aina alemman moduulin läpi seuraavaan. Raspberry Pi ei sisällä esimerkiksi analogisia tuloja, mutta analogia-digitaalimuunninmoduulilla ominaisuuden voi lisätä helposti. (Adams 2014.)

Vaihtoehtoinen funktio	Funktio	Liitin nro		Funktio	Vaihtoehtoinen funktio
	3,3V PWR	1		2	5V PWR
I2C1 SDA	GPIO 2	3		4	5V PWR
I2C1 SCL	GPIO 3	5		6	GND
	GPIO 4	7		8	UART0 TX
	GND	9		10	UART0 RX
	GPIO 17	11		12	GPIO 18
	GPIO27	13		14	GND
	GPIO 22	15		16	GPIO 23
	3,3V PWR	17		18	GPIO 24
SPI0 MOSI	GPIO 10	19		20	GND
SPI0 MISO	GPIO 9	21		22	GPIO 25
SPI0 SCLK	GPIO 11	23		24	GPIO 8
	GND	25		26	GPIO 7
	Reserved	27		28	Reserved
	GPIO 5	29		30	GND
	GPIO 6	31		32	GPIO 12
	GPIO 13	33		34	GND
SPI1 MISO	GPIO 19	35		36	GPIO 16
	GPIO 26	37		38	GPIO 20
	GND	39		40	GPIO 21
					SPI1 CS0
					SPI1 MOSI
					SPI1 SCLK

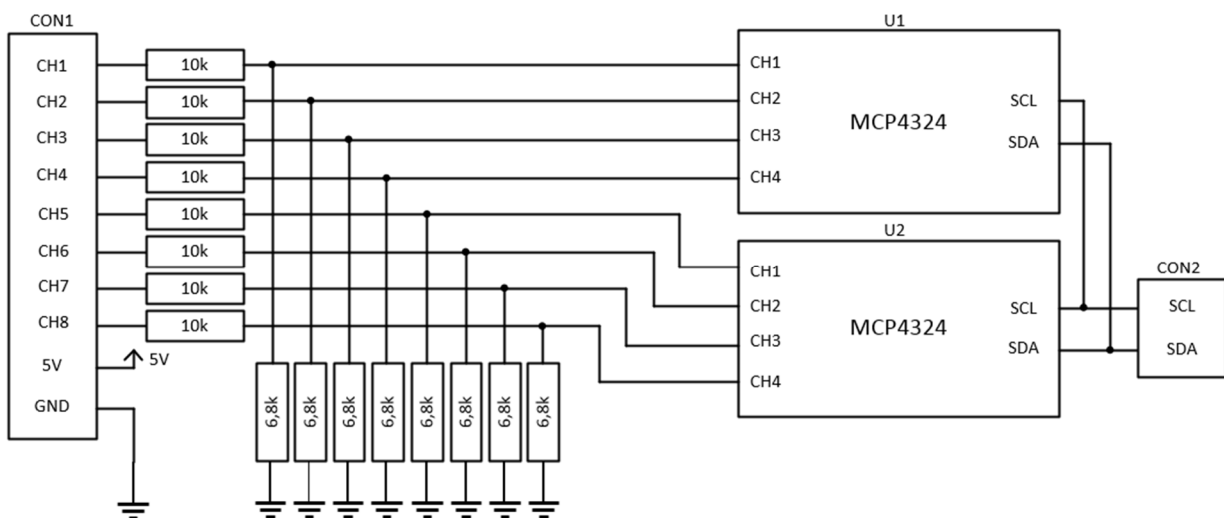
KUVIO 8. Raspberry Pi 3 I/O-liittimen pinnijärjestys ja toiminnot (mukaillen Microsoft)

## Analogia-digitaalimuunnin

Analogisten antureiden liittämiseksi Raspberry Pi:n päälle lisättiin kuvan 5 mukainen A/D-, eli analogia-digitaalimuoduuli. Käytettävä moduuli perustuu kahteen Microchipin valmistamaan MCP3424 analogia-digitaalimuunninpiiriin. Piirit ovat 4-kanavaisia ja moduulissa on näin ollen 8 analogista kanavaa. Näiden piirien resoluutio on 18 bittiä. Moduulissa tulot on skaalattu 0-5V:n alueelle yksinkertaisella jännitteenjaolla (KUVIO 9). Muunnin kytkeytyy kahdella johtimella Raspberry Pi:n I<sup>2</sup>C-väylään. (AB Electronics UK.)



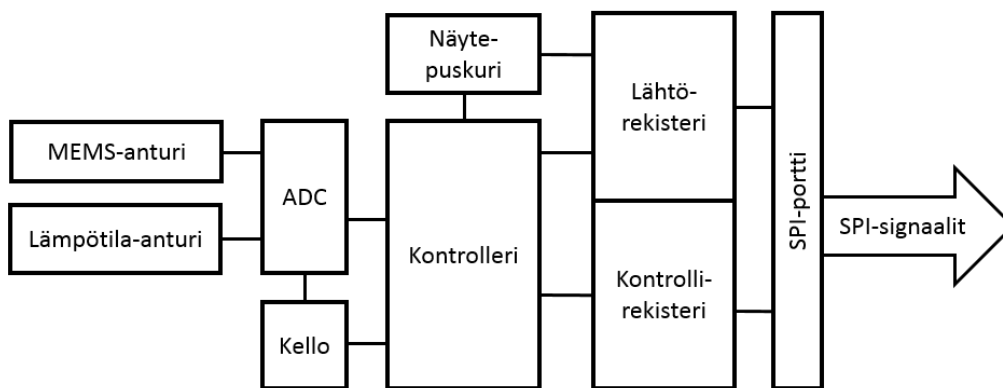
KUVA 5. Raspberry Pi:n voidaan lisätä analogisia tuloja A/D-kortilla.



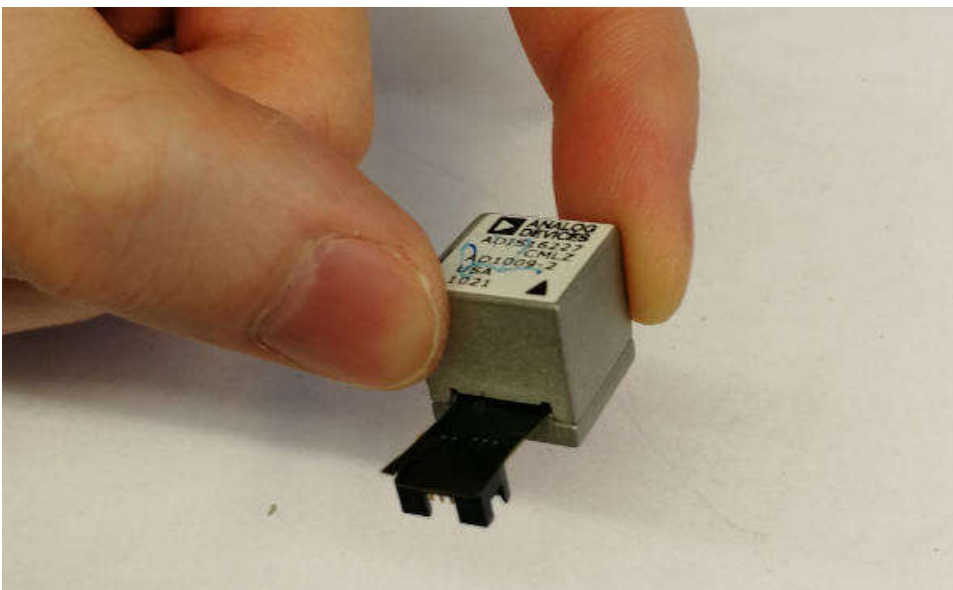
KUVIO 9. Jännitealuetta on laajennettu vastuksilla (mukaillen AB Electronics UK)

## Kiihtyvyyssanturi

Värähtelyn mittaamiseen valittiin Analog Devices ADIS16227 anturi (KUVA 6). Siinä on 3-akselisen anturikomponentin lisäksi integroituna useisiin, suhteellisen monimutkaisiin toimiin pystyvä ohjelmoitava signaalinkäsittelyprosessori. Data voidaan käsitellä aika- tai taajuustasossa ja valittavissa on mm. erilaisia suotimia, keskiarvoistus ja 512 pisteen FFT (Fast Fourier Transform). Anturi liitetään järjestelmään SPI-väylän kautta. Kiihtyvyyssmittauksen lisäksi laite sisältää lämpötilan ja käyttöjännitteen mitaukset. Anturin lohkokaavio on esitetty kuviossa 10. Anturi on pakattu 15x15x15mm kokoiseen valettuun alumiinikoteloon. Anturin mekaaninen toimintaperiaate on esitetty kuviossa 11.

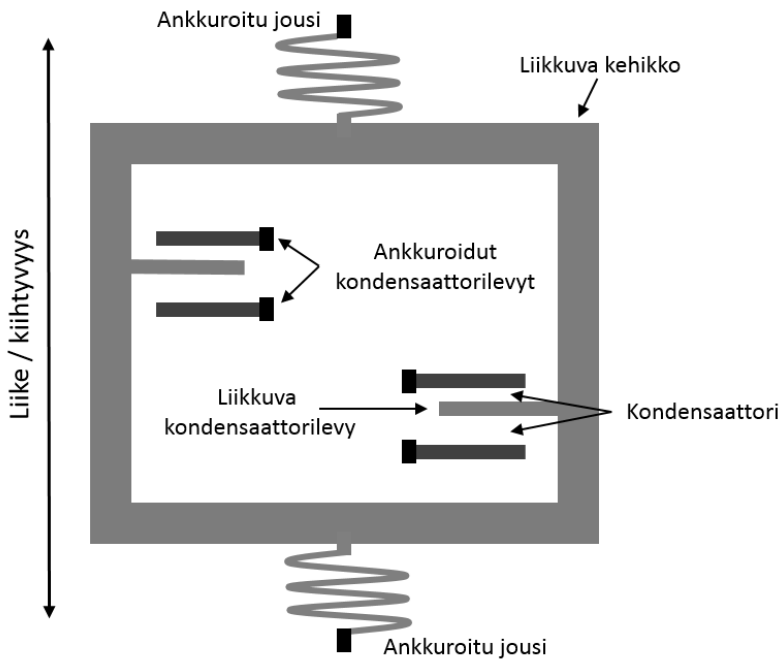


KUVIO 10. Kiihtyvyyssanturin lohkokaavio (mukaillen Analog Devices 2012, 7)



KUVA 6. Analog Devices ADIS16227 kiihtyvyyssanturi.

Rungon sisälle on kiinnitetty jousien varaan kehikko, joka pääsee liikkumaan kaikkiin suuntiin. Kehik-  
koon kiinnitetty levyt yhdessä runkoon kiinnitettyjen levyjen kanssa muodostavat kondensaattorit, joi-  
den läpi kulkevasta vaihtovirrasta mitataan kiihtyvyys kuhunkin suuntaan. Mitattu tieto käsitellään an-  
turin sisäisessä prosessorissa. (Analog Devices 2012, 7.)



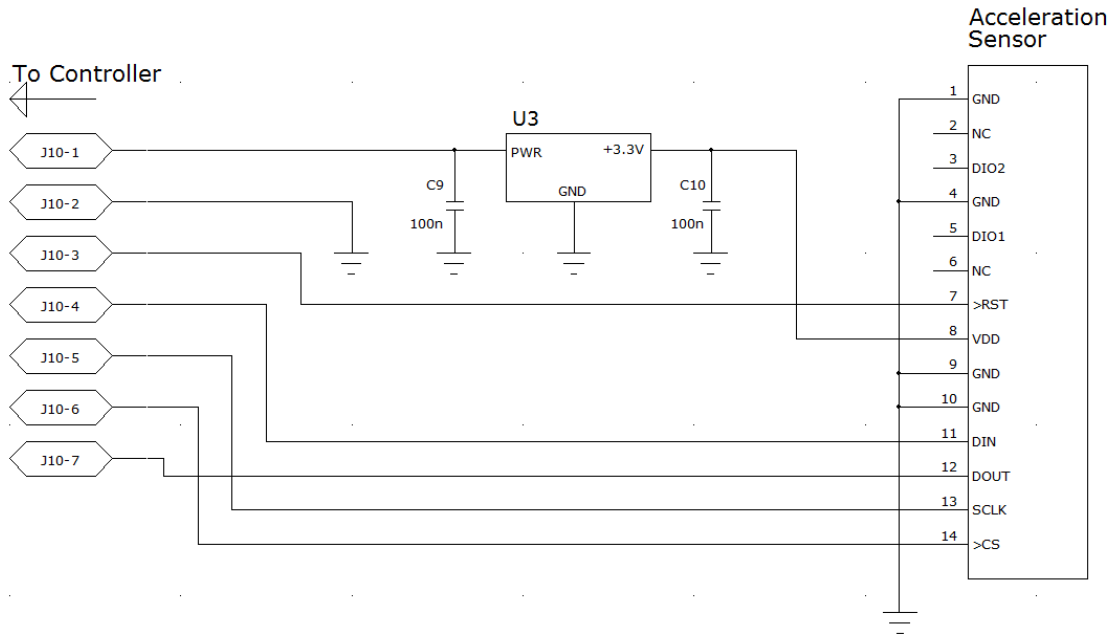
KUVIO 11. Kiihtyvyysanturin mekaanisen toiminnan periaate (mukaillen Analog Devices 2012, 7)

Vaikka anturi muuten on varsin jämakkä, siinä on lyhyt liitosjohto, joka vaatii mekaanisen suojauksen ja erillisen piirikortin liittimiseen. Anturia varten työstettiin Centrialla kotelo alumiinista (KUVA 7), johon sille suunniteltiin piirikortti liittintä varten.



KUVA 7. Anturille valmistettiin alumiinista kotelo.

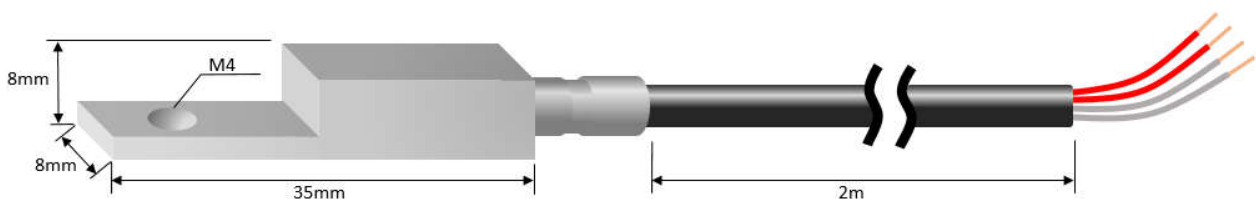
Anturi vaatima 3,3V jännite olisi saatavissa suoraan Raspberryltä mutta koska anturin syöttökaapeli on suhteellisen pitkä, niin anturin piirikortille lisättiin regulaattori, jota syötetään Raspberryltä saatavalla 5V jännitteellä. Näin kaapelin häviöt tai häiriöt eivät vaikuta anturin käyttöjännitteeseen. Piirikortti toteutettiin pintaliitoskomponentein. Kytchentäkaavio on esitetty kuviossa 12.



KUVIO 12. Kiihtyvyysanturille suunnitellun liitäntäkortin kytchentäkaavio.

### Lämpötila-anturit ja mittausvahvistin

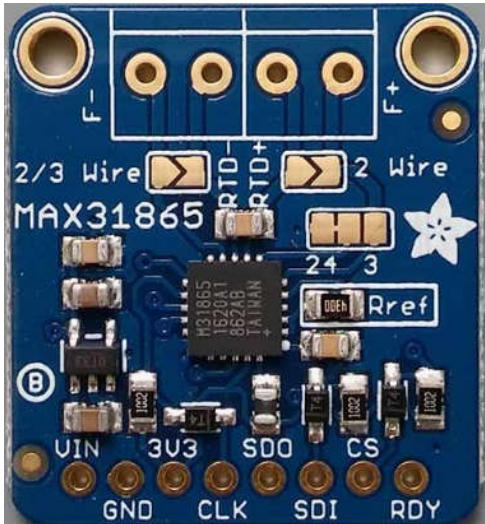
Lämpötilan mittaamiseen valikoitui PT100-anturi, joka on standardoitu lämpötila-anturi. Kuviossa 13 on esitetty WIKA TF45-anturin rakenne ja mitat. Anturikomponentti on pakattu vesitiiviiseen teräksiseen koteloon, joka on mahdollista kiinnittää ruuvilla mitattavaan kohteeseen. Sen vaste on lineaarinen ja siinä on tarkoitukseen sopiva mittausalue ja riittävä tarkkuus. Anturissa on johdotus 4-johdinmittausta varten. (WIKA Instrument 2010, 2.)



KUVIO 13. WIKA TF45 PT100 lämpötila-anturin mitat (mukaillen verkkosivuilta Automation24)

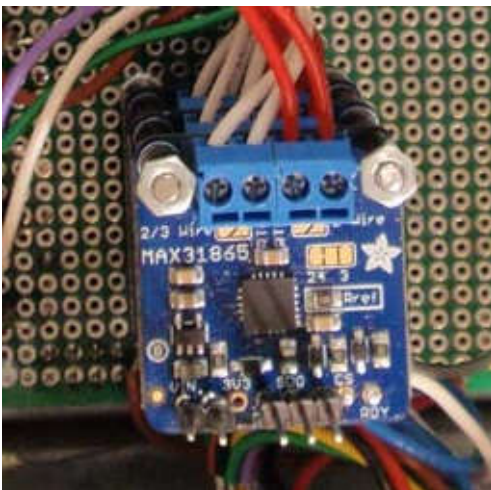


4-johdinmittaus tarkoittaa käytännössä sitä, että anturin molempiin napoihin on liitetty kahdet johtimet, jotka kytketään toimintoa tukevan mittavahvistimen liittimiin. 1 johdinpari syöttää anturille mittauksessa käytettävän vakiovirran, ja toista paria käytetään anturin yli jäävän jännitehäviön mittaamiseen. Näin kaapelin häviöt ja lämpötilavaikutus saadaan eliminoidua. (WIKI 2010, 2.)



KUVA 8. vahvistinkortti PT100-anturille.

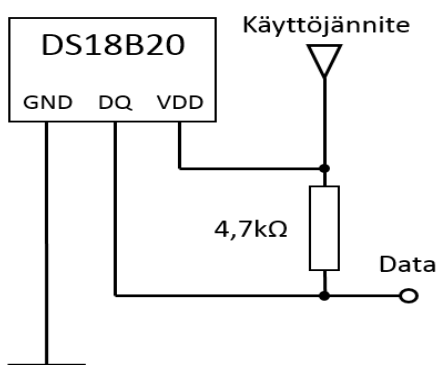
PT100-anturi, kuten mikä hyvänsä resistiivinen anturikomponentti tarvitsee vahvistimen, joka muuntaa sen resistanssin käsiteltävään muotoon. Käytettävälle anturille löytyi pienikokoinen Maxim Integratedin MAX31865-piiriin pohjautuva, 2-,3- ja 4-johdinmittausta tukeva kokeilukortti (KUVA 8). Sen rakenne on hyvin yksinkertainen. Pintaliitosmikropiiri on asennettu pienelle piirikortille vain muutaman oheiskomponentin kera. MAX31865 mittaa PT100-anturin resistanssin ja muuntaa siitä saatavan lämpötilatiedon digitaalseksi. Digitaaliväylä on SPI. (Adafruit.)



KUVA 9. MAX31865-kortit asennettuna.

Jokaiselle lämpötilan mittauspisteelle tarvitaan oma anturi ja vahvistin. Tämä kortti SPI-väylän kanssa mahdollistaa niiden pinoamisen päällekkäin, sillä käyttöjännite (VIN, GND) ja SPI-väylän kello-, ja datasiinaalit (CLK, SDO, SDI) kytketään rinnakkain. Signaalit voidaan viedä kortilta seuraavalle niiden läpi. Piirin valinta- (CS) ja valmis- (RDY) signaalit ovat piirikohtaisia ja täytyy johdottaa erikseen kullekin vahvistimelle. Antureille on liittimet kortin toisessa reunassa, jossa on myös ruuvinreiät. Reikiä hyödynnettiin korttien kiinnittämisessä. Kaikki kortit kasattiin päällekkäin kahdella pitkällä ruuvilla (KUVA 9).

Vertailuanturiksi valittiin yksinkertaisen liitettävyyden vuoksi Dallas semiconductorin digitaalinen puolijohdeanturi DS18B20. TO-92-koteloon pakatussa anturissa on 1-Wire<sup>®</sup> liitäntä, joten anturin liittämiseksi tarvitaan käyttöjännitteen lisäksi vain yksi datajohdin. Tarvittavia ulkoisia komponentteja on vain yksi datajohtimen ylösvetovastus (KUVIO 14). Mitta-alue on  $-55^{\circ}\text{C}$  -  $+125^{\circ}\text{C}$ , tarkkuus  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  välillä  $-10^{\circ}\text{C}$   $+85^{\circ}\text{C}$  ja resoluutio 12 bittiä. (Maxim Integrated 2015, 1.)



KUVIO 14. DS18B20 lämpötila-anturin kytkentä (mukaillen Maxim Integrated 2015, 7)

Periaatteessa anturin datalinjaan asennettua ylösvetovastusta ei välttämättä tarvitsisi, sillä Raspberryn I/O-portissa sellainen on jo valmiina. Anturi varustettiin samanlaisella kaapelilla kuin muutkin lämpötila-anturit. Vaikka ympäristön lämpötilaa mittaavaa anturia ei tarvitse välttämättä kiinnittää yhtä jämsästi mitään pintaa vasten kuin muita antureita, niin mekaanisen kestävyys ja kosteussuojauksen vuoksi se kiinnitettiin metalliseen kiinnitysrenkaaseen ja suojattiin kutistesukalla.

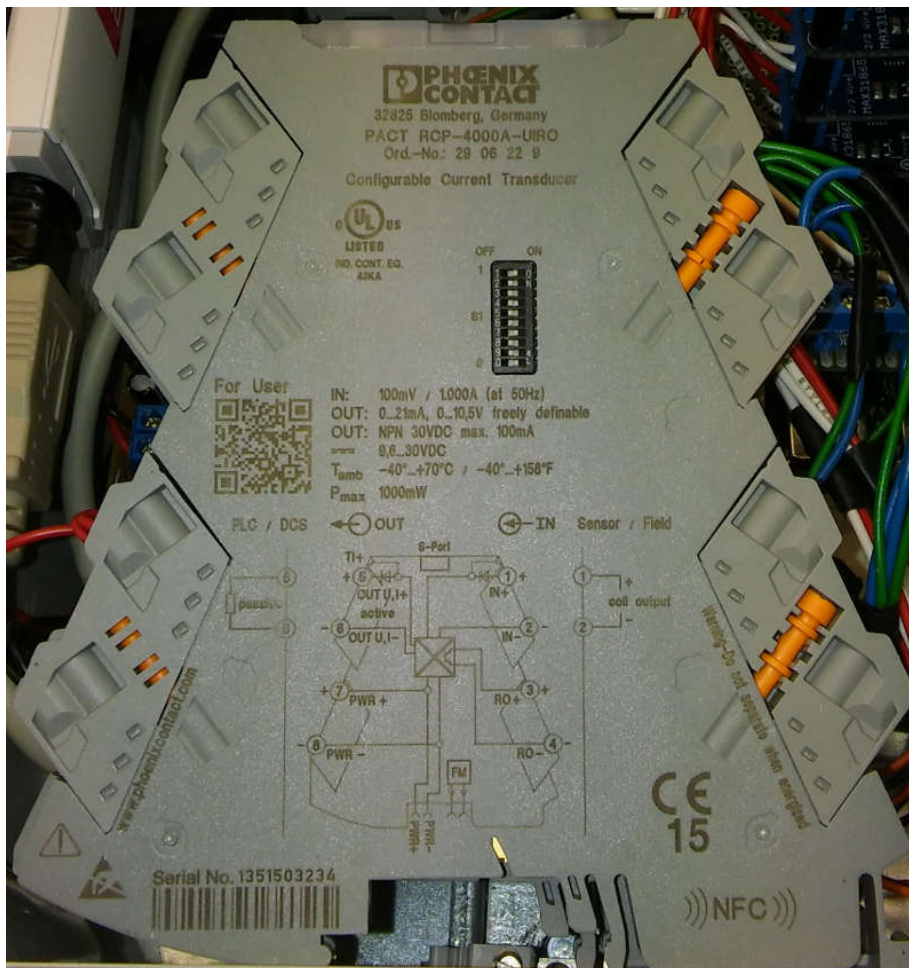
Lämpötila-antureiden toiminta tarkistettiin vertaamalla niiden antamia tuloksia toisiinsa kahdessa tunnetussa lämpötilassa. Anturit laitettiin ensin jääveeten, jonka lämpötila oli noin  $0^{\circ}\text{C}$  ja tarkistettiin lue-



PT100 antureille tehtiin korjauskertoimet niin, että kaikki anturit näyttävät samoja lukemia. Vertailuan-  
turina käytettiin digitaalista DS18B20 anturia, jonka mittaustulosten oletettiin olevan lähinnä oikeaa.

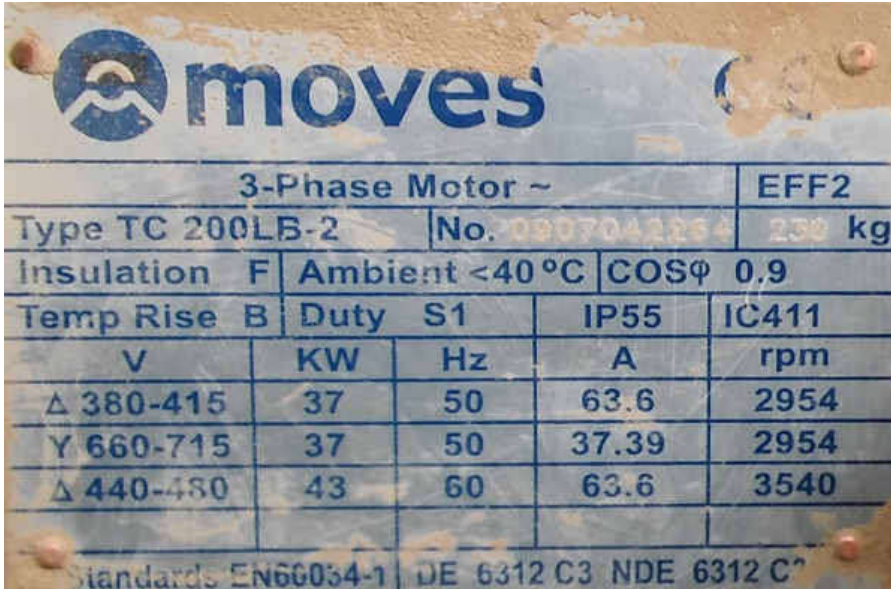
## Virranmittausjärjestelmä

Puruimurissa olevan moottorin ottaman virran mittaamiseksi soveltuu parhaiten pihtityyppinen virtamit-  
tari. Phoenix Contact PACT RCP-4000A (Kuva 10) on jälkiasennettava virtamuuntaja. Siinä on asetel-  
tavat mitta-alueet ja valittavissa jännite- tai virtaviestilähtö. Mitta-alueet voidaan valita 0...100A ja  
0...4000A väliltä portaittain. Parhaan häiriönsiedon vuoksi lähdöksi valittiin 4...20mA virtaviesti.  
(Phoenix Contact 2016, 15.)



KUVA 10. Phoenix Contact PACT RCP-4000A virtamuuntaja.

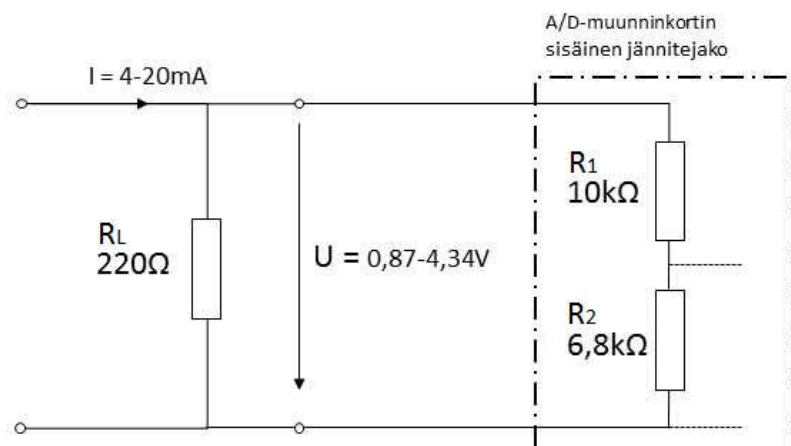
Topi-keittiöiden puruimurin moottorin tyyppikilvestä (KUVA 11) selviää, että sen nimellisteho on 37 kW ja 400V verkkoon liitettynä nimellisvirta on 63,6 A. Näin ollen virtamuuntajien pienin mitta-alue 0...100 A riittää.



3-Phase Motor ~				EFF2	
Type TC 200LB-2		No. 0907043254		230 kg	
Insulation F		Ambient <40 °C		COSφ 0,9	
Temp Rise B		Duty S1		IP55 IC411	
V	KW	Hz	A	rpm	
Δ 380-415	37	50	63.6	2954	
Y 660-715	37	50	37.39	2954	
Δ 440-480	43	60	63.6	3540	
Standards EN60034-1 DE 6312 C3 NDE 6312 C					

KUVA 11. Tyyppikilvestä nähdään moottorin nimellisarvot.

Virta-antureilta saatava tieto tulee virtaviestinä, joten ennen A/D-muuntimelle syöttämistä se pitää muuttaa jännitteeksi. Tämä toteutettiin yksinkertaisesti 220Ω vastuksilla. Kultakin virta-anturilta tuleva virtaviesti johdetaan vastuksen läpi ja vastuksen yli vaikuttava jännite mitataan A/D-muuntimella. 220Ω vastuksen rinnalle kytkeytyy A/D-muunninkortilla oleva jännitteenjakovastussarja joka vaikuttaa kokonaisresistanssiin kuvion 15 mukaisesti. Kortin kytkentäkaaviosta nähdään, että ko. vastukset ovat 10 kΩ ja 6,8 kΩ.



KUVIO 15. Virta-jännitemuunnoksessa resistanssiin vaikuttavat A/D-muuntimen vastukset.

Vastusten rinnankytkennän kokonaisresistanssi  $R$  voidaan laskea kaavalla

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

Resistanssin yksikkö on ohmi ( $\Omega$ ).

Näin ollen virta-jännitemuuntimen kokonaisresistanssi saadaan kaavalla

$$R_{kok} = \frac{(R_1 + R_2) R_L}{R_1 + R_2 + R_L}$$

missä  $R_1$  ja  $R_2$  ovat kortin sisäiset vastukset ja  $R_L$  on A/D-kortin rinnalle kytkettävä vastus.

$$R_{kok} = \frac{(10^3 \Omega + 68^2 \Omega) 220 \Omega}{10^3 \Omega + 68^2 \Omega + 220 \Omega} = 217,16 \Omega$$

Kortille menevän jännitteen  $U$  skaala saadaan resistanssin arvosta ohmin lain mukaan

$$U = R \cdot I \quad (2)$$

missä  $U$  on jännite,  $R$  on A/D-kortin kokonaisresistanssi ja  $I$  on kortille tuleva virta. Jännitteen yksikkö on voltti (V) ja virran yksikkö ampeeri (A).

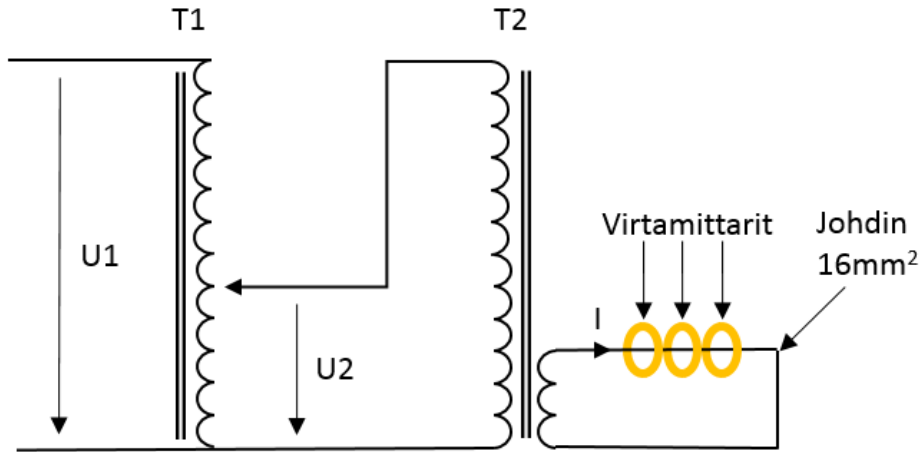
Kokonaisresistanssin ollessa  $217,16 \Omega$  ja virtaviestin ollessa  $4 \dots 20 \text{mA}$  jännitearvoiksi saadaan

$$U_{min} = 217,16 \Omega \times 4 \cdot 10^{-3} \text{A} = 0,87 \text{V}$$

$$U_{max} = 217,16 \Omega \times 2 \cdot 10^{-2} \text{A} = 4,34 \text{V}$$

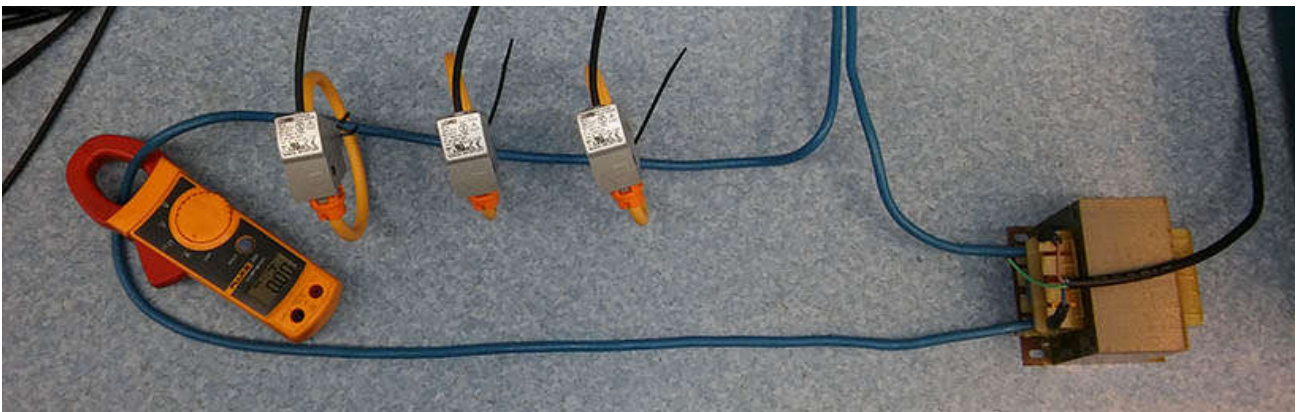
Virtamittauksen toimivuus testattiin laboratoriossa kytkemällä kaikki virranmittauskelat saman virtajoh-timen ympärille (KUVA 12). Kuviossa 16 on esitetty kaavio kytkennästä. Johtimena käytettiin  $16 \text{mm}^2$  eristettyä kuparijohdinta, josta oli tehty kolmen kierroksen toisiokäämi 250VA verkkomuuntajaan T2. T1 on 230V ( $U_1$ ) jännitteellä toimiva säätömuuntaja, josta T2:n syöttöjännitettä  $U_2$  säätämällä voitiin

vaikuttaa virran  $I$  voimakkuuteen. Referenssimittarina virran mittaamiseen käytettiin Fluke 322 pihtivirtamittaria. Mainittakoon, että tällä testausasetelmalla oli mahdollista muodostaa johtimeen suurimmillaan lähes 500A virta. Luonnollisesti johdin lämpenee tällöin voimakkaasti.

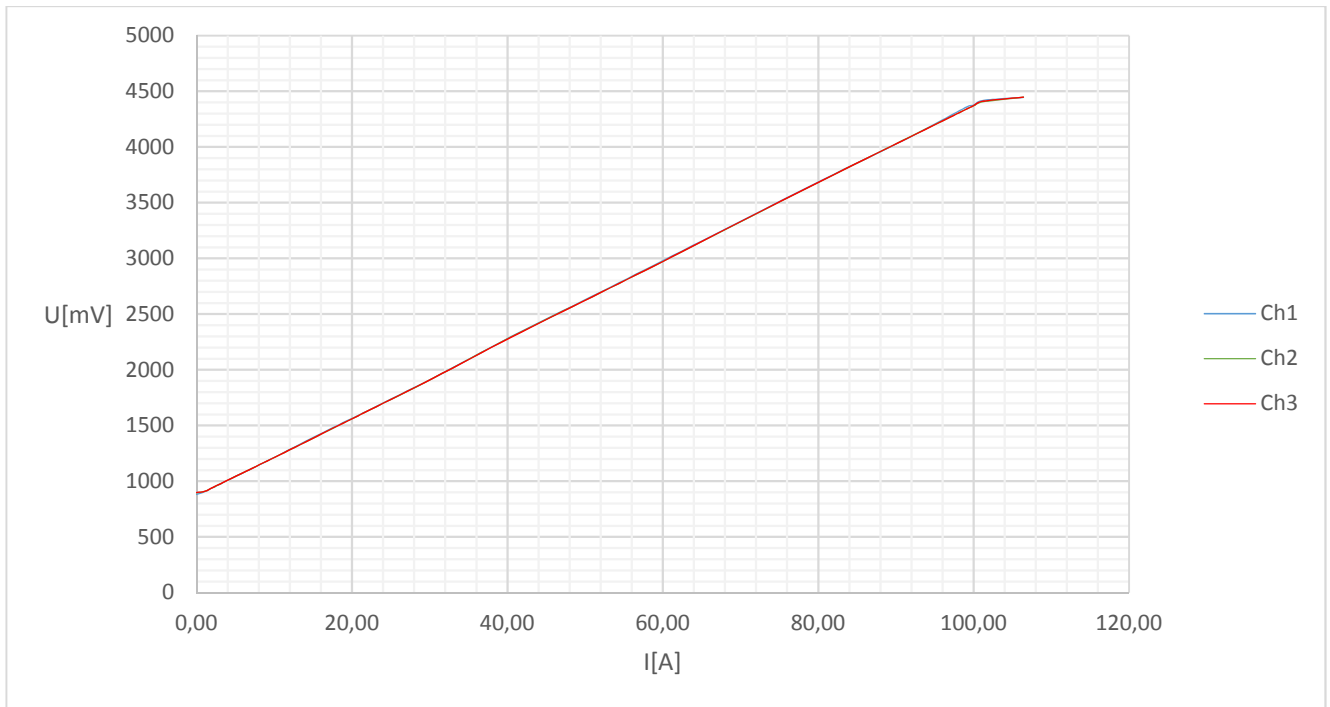


KUVIO 16. Säädetty virtalähde virtamittareiden kalibrointiin.

Virtamittareihin oli valittu 0-100A alue. Silmukoiden läpi syötettiin pykälittäin virtaa kyseisellä alueella ja A/D-muuntimelta mitattiin jännite. Jännitteen mittaamiseen käytettiin Fluke 179 yleismittaria. Tulokset kirjattiin taulukkolaskentaohjelmaan ja siitä piirrettiin kuvaaja (KUVIO 17). Tulokset eri mittareiden välillä ovat niin pieniä, ettei niitä on vaikea erottaa kuvaajasta. Erot johtuvat ainakin suurimmaksi osaksi siitä, että suuremmilla virroilla johtimen resistanssi muuttui johtimen lämpötilan kasvaessa ja koska jännite mitattiin yleismittarilla yhdestä virtamuuntajasta kerrallaan, niin virta ehti muuttua jännitemittaus-ten välillä. Kuvaajasta on nähtävissä mittausalueen loppuminen odotetusti 100A kohdalle, jossa virran suhteen lineaarisesti kasvava jännite saavuttaa suurimman arvonsa.



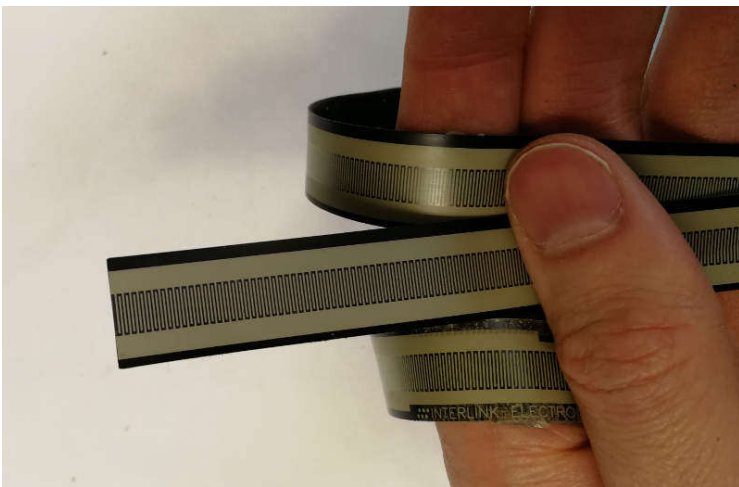
KUVA 12. Virranmittauksen testausasetelma.



KUVIO 17. Virtamittarien lähtöjännitteet suhteessa mitattavaan virtaan.

### Puhaltimen eheyden mittaus

Puhaltimen eheyttä täytyy pystyä mittaamaan lähes koko kehän pituudelta. Tämän vuoksi kohteeseen pyrittiin löytämään mahdollisimman pitkä anturikomponentti. Pisin vaihtoehto on Interlinkin valmistama paineanturinauha (KUVA 13). Se on resistiivinen komponentti, jonka resistanssi muuttuu siihen kohdistuvan paineen vaikutuksesta ja on kääntäen verrannollinen paineeseen (Interlink Electronics, 3).



KUVA 13. Interlink FSR408 paineanturinauhaa.

Nauhan takapuolella on kaksipuolinen teippi, jolla se voidaan kiinnittää puhaltimen pintaan suhteellisen helposti. Sääsuojaus on kuitenkin tarpeen ja se tehtiin ohuella silikonikerroksella. Tämän nauhan aktiivisen osan pituus on kuitenkin vain vähän yli 60 cm (KUVIO 18), joten koko kehän valvomiseen tarvitaan 3 – 4 nauhaa.

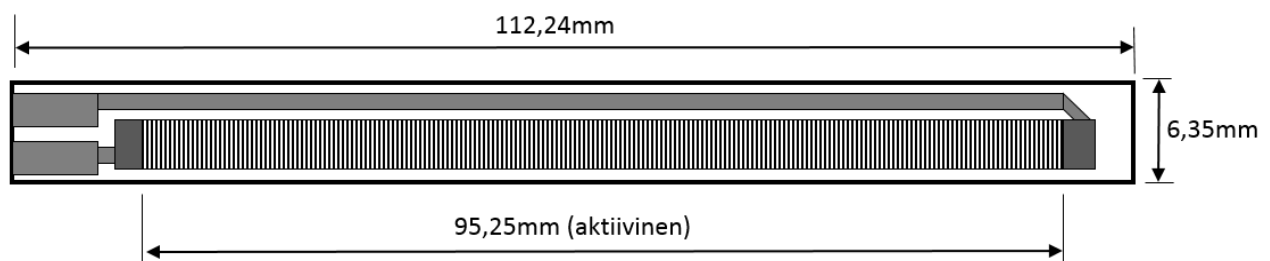


KUVIO 18. Interlink FSR408 mitat (mukaillen Interlink Electronics, 9)

Toisena vaihtoehtona päätettiin kokeilla kuvassa 14 näkyvää Spectra symbolin taipumisanturia. Se on periaatteeltaan taipuisa, resistiivinen liuska, jonka resistanssi riippuu siitä, kuinka paljon liuskaa taivutetaan. Aktiivisen osan pituus on vain noin 95mm (KUVIO 19), joten näitä pitäisi olla jo yli 20 kpl koko puhaltimen kehän tarkkailemiseen.



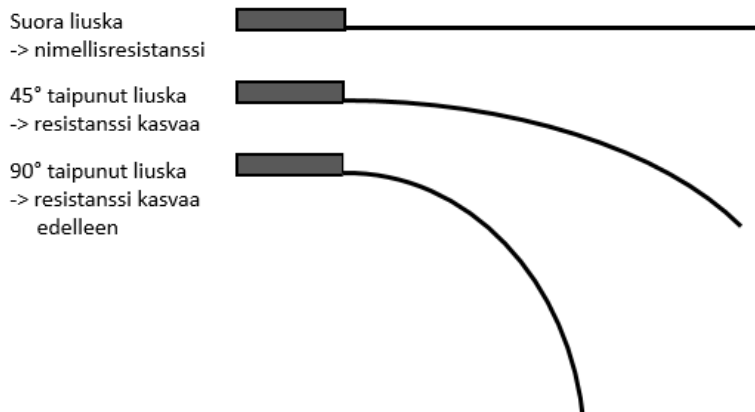
KUVA 14. Spectra Sensor FS anturi ala- ja yläpuolelta.



KUVIO 19. Spectra Sensor FS anturin mitat (mukaillen Spectra Symbol 2014, 1)

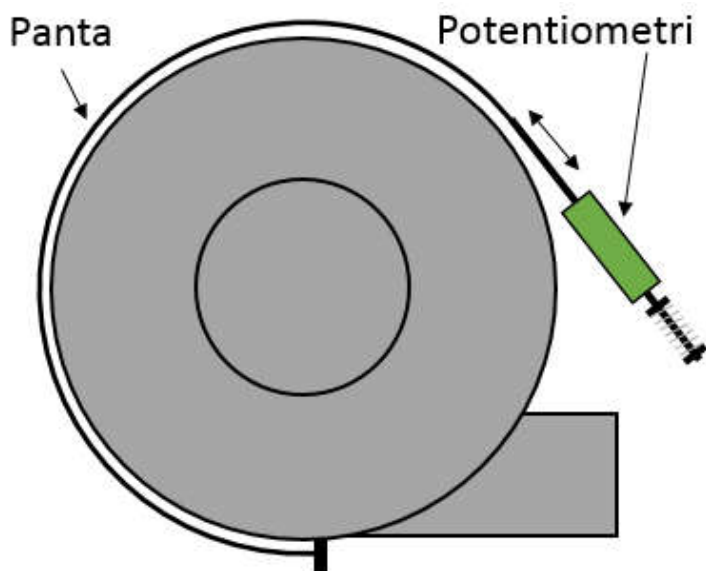


Mittausalue on 0-90 astetta eli varsin laaja tähän tarkoitukseen. Todennäköisesti imurin kehä ei taivu kovin paljoa ennen kuin se särkyy kokonaan, joten anturi ei välttämättä sovellu kovin hyvin tähän tarkoitukseen. Kuvion 20 mukaisesti liuskan resistanssi on lepoasennossa 10 kilo-ohmia ja 90 asteen kulmaan taivutettuna 60-110 kOhm. (Spectra Symbol, 1.)



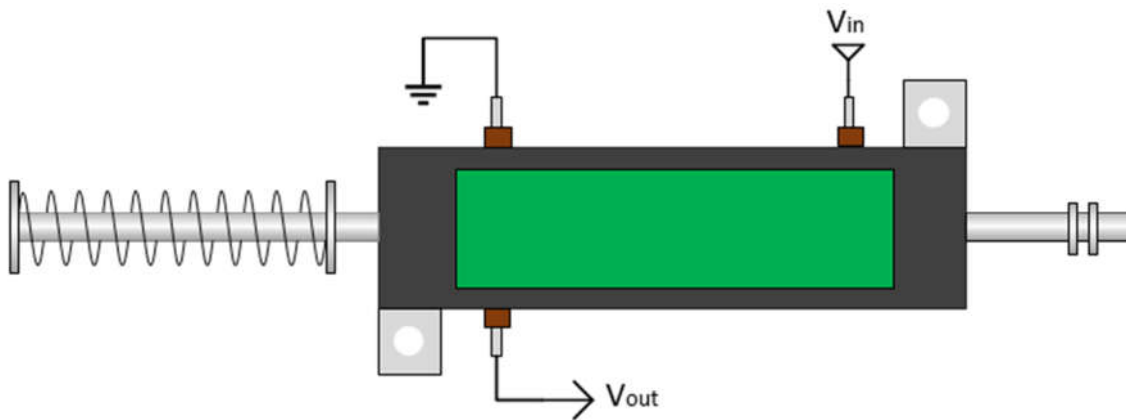
KUVIO 20. Liuskan taivutuksen vaikutus resistanssiin (mukaillen Spectra Symbol 2014, 1)

Kolmantena vaihtoehtona on puhaltimen ympäri kierrettävä teräspanta, jonka 1. pää on ankkuroitu kiinteästi imurin runkoon ja 2. pää on jousitettu, jolloin imurin kehän venyessä pannan jousitettu pää liikkuu. 2. päähän on kiinnitetty lineaarianturi, jolla pannan pään liikettä mitataan (KUVIO 21). Panta on kiristetty jousella tiukasti imurin pintaa vasten.



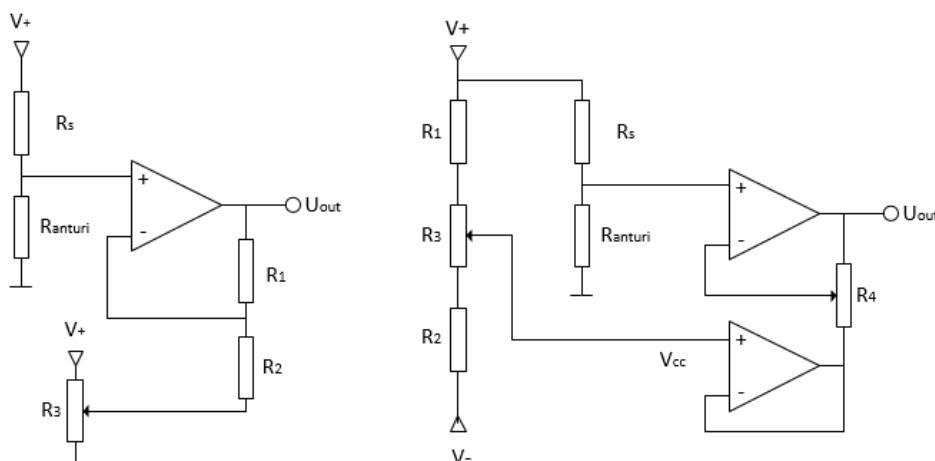
KUVIO 21. Lineaaripotentiometrin periaatekaavio.

Anturina käytetään Midori Green Pot potentiometriä, jonka ääripoihin johdetaan 5V jännite ja keski- ja maanavan väliltä mitataan lähtöjännite  $V_{out}$  (KUVIO 22).



KUVIO 22. Lineaaripotentiometri (mukaillen Midori America Corporation 2014, 1)

Lineaaripotentiometriä lukuun ottamatta venymäantureita ei voida kytkeä suoraan A/D-muuntimelle, vaan ne tarvitsevat sopivan sovitusvahvistimen. Koska antureiden resistanssit voivat olla hyvinkin erilaiset kiinnityksen jälkeen, tarkoitukseen suunniteltiin sopiva vahvistinkortti offset- ja vahvistuksen säätömahdollisuuksilla. Sekä Spectra Sensorin, että Interlinkin datalehdissä oli periaatekytkentä operaatiovahvistimella toteutettavalle kytkennälle (KUVIO 23). Näiden pohjalta suunniteltiin 4-kanavainen vahvistinkortti, jossa on kanavakohtaiset nollatason ja vahvistuksen säädöt. Vahvistinkortin käyttöjännitteeksi valittiin 24V, joka on saatavissa virtasilmuikkamuuntajien virtalähteeltä.

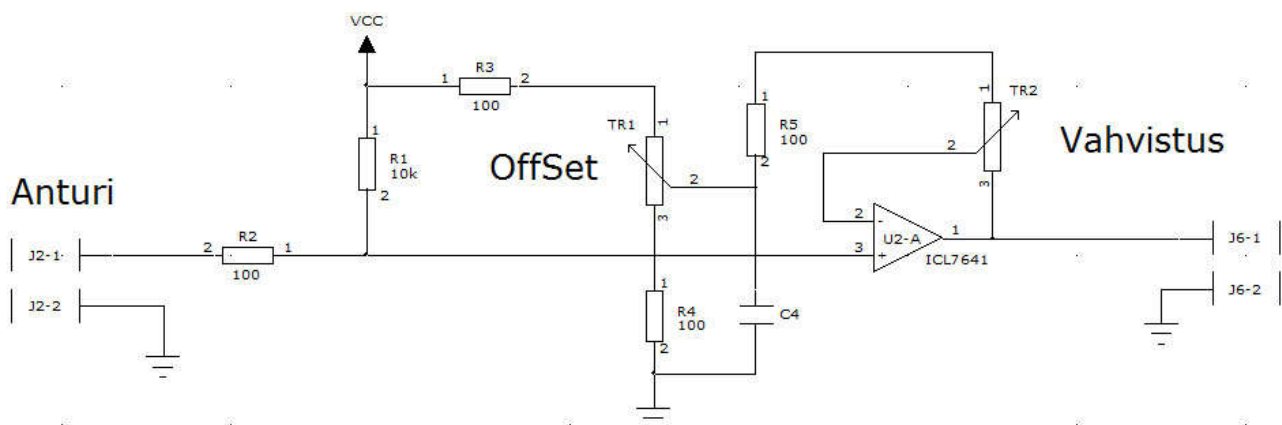


KUVIO 23. Esimerkkikytkentöjä puskurivahvistimeksi (mukaillen Spectra Symbol 2014, 2)



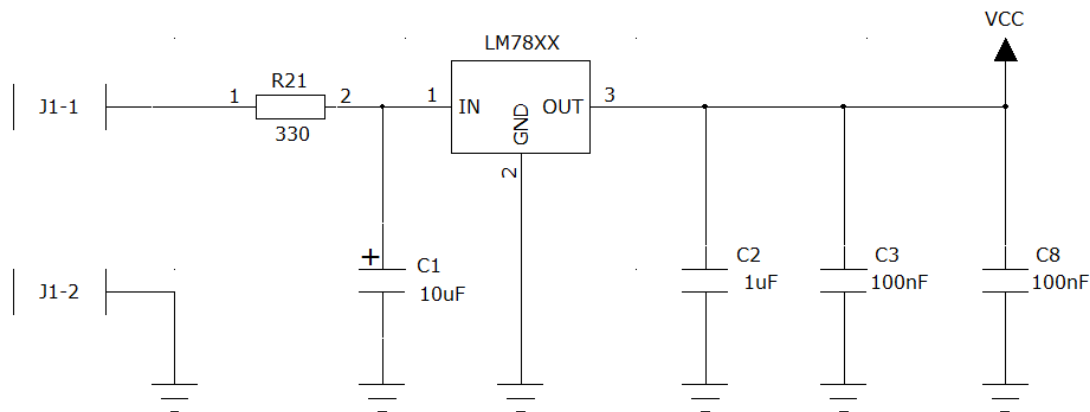
Operaatiovahvistimeksi valittiin ICL7641ECPD+ nelikkopiiri. Se on pakattu 14 nastaiseen DIP-koteloon ja on siksi helppo asentaa yksinkertaiselle piirikortille. Vahvistimen käyttöjännitealue on 2-16V yksipuolisella käyttöjännitteellä. Vahvistin on niin sanottu ”rail-to-rail” lähtöinen, eli lähtöjännite voi saavuttaa liki käyttöjännitteen tason. 1M $\Omega$  kuormalla lähtöjännite voi olla noin 4,9V käyttöjännitteen ollessa 5V. (Maxim integrated 2010, 1, 7.)

Tällöin 5V käyttöjännite tuottaa riittävän suuren lähtöjännitteen A/D-muuntimelle. Käytännössä A/D-kortin vahvistimelle aiheuttama kuorma on 16,8k $\Omega$  ja operaatiovahvistimen lähtöjännite jää noin 4,5 volttiin, mutta riittää silti hyvin. KytKentä (KUVIO 24) mukailee hyvin pitkälti Spektra Sensorin antamaa mallia. Säätoalueen rajoittamiseksi potentiometrien päihin lisättiin pienet kiinteät vastukset. Vahvistus on hyvä saada säädettyä pienimmillään arvoon 1. Tässä tilanteessa takaisinkytkentäsilman resistanssi tulee olla 0 ja sen takia vahvistuksen säätöpotentiometrin toiseen päähän vastusta ei tarvita. Nollatason säätöön (Offset) lisättiin pieni kondensaattori häiriöiden minimoimiseksi. Yksi nelikkopiiri riitti kaikkien neljän kanavan vahvistimien toteuttamiseen.

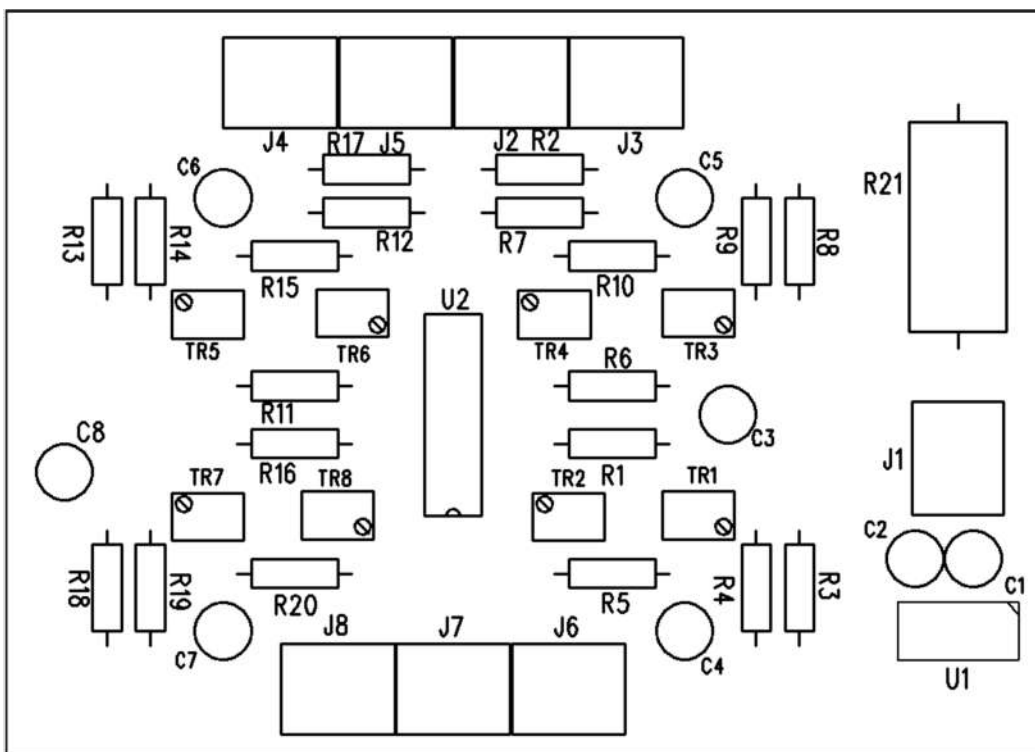


KUVIO 24. Paineanturivahvistimen yhden kanavan kytkentäkaavio.

Operaatiovahvistimen käyttöjännite syötetään samalla kortilla sijaitsevalla 5V lineaariregulaattorilla. Koska vahvistinkortin käyttöjännite, eli regulaattorille tuleva jännite on 24V, lisättiin regulaattorille sarjavastus (KUVIO 25). Näin jännitteen alennuksesta aiheutuva tehohäviö jakautuu vastuksen ja regulaattorin kesken, eikä kumpikaan komponentti kuumene liikaa. Piirikortin osasijoittelukuva on esitetty kuviossa 26. Piirikaavion ja piirikortin suunnittelu toteutettiin Mentor Graphicsin PADS Logic- ja Layout ohjelmistoilla.



KUVIO 25. Paineanturivahvistimen jännitteensyöttöön suunniteltiin 5V vakavointikytkentä.

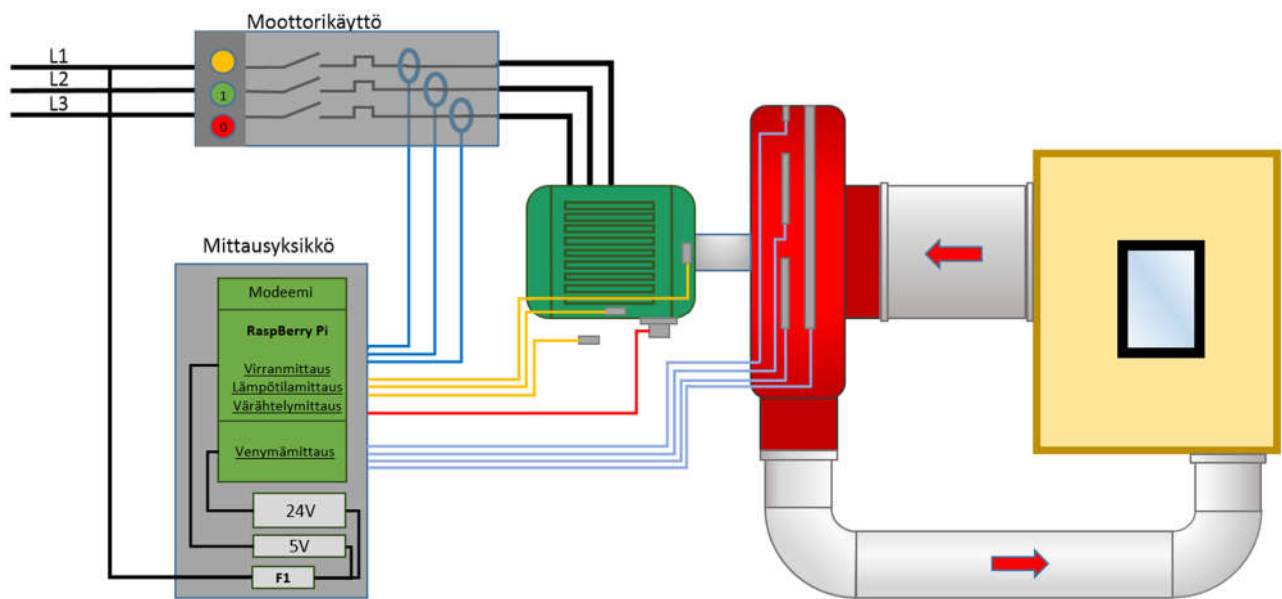


KUVIO 26. Paineanturivahvistimen osasijoittelukuva.

### 3.2 Laitteiston rakentaminen

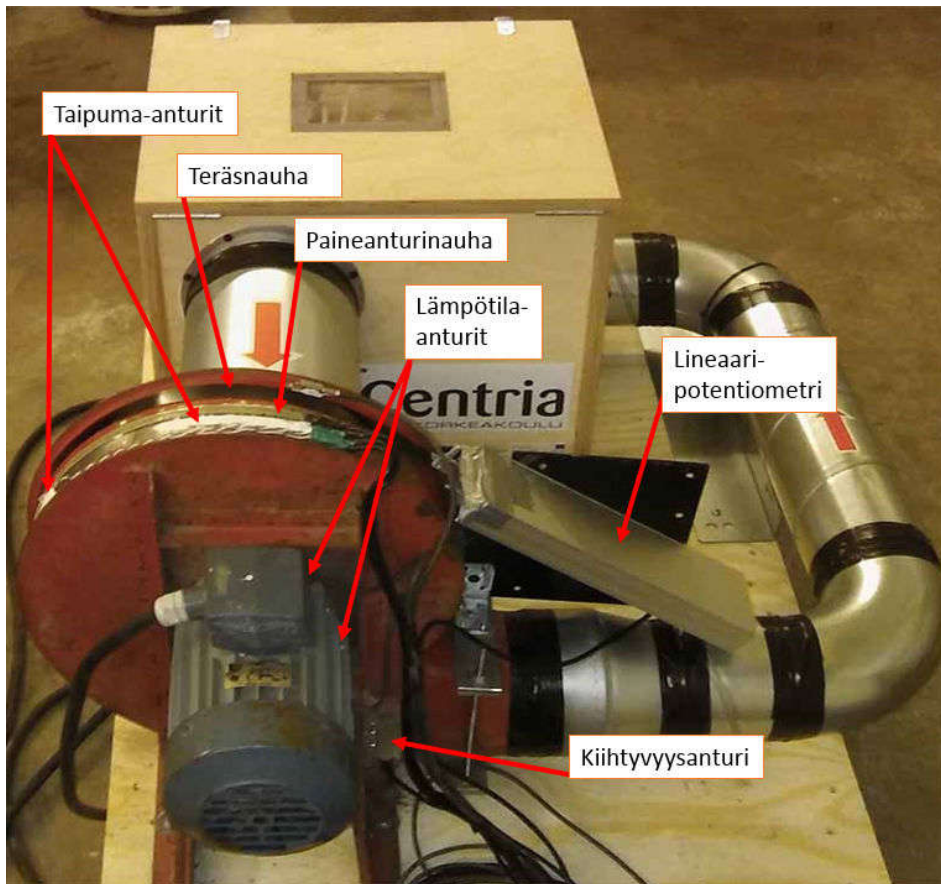
Mittauslaitteistoon sisältyy antureita joiden soveltuvuudesta ei ollut varmuutta. Sen takia päätettiin rakentaa pieni purinsiirtolaite Centrian laboratoriossa, johon anturit voidaan kiinnittää ja testata niiden toimivuutta ennen varsinaiseen kohteeseen asentamista.

Puruimurina käytettiin keskipakopuhallinta, joka asennettiin kierrättämään purua suljetussa piirissä. Piiriin kuuluu vanerilevystä valmistettu laatikko, josta imuri ottaa purun ja puhalttaa sen sinne takaisin (KUVIO 27). Laatikossa on ikkuna kierron seuraamiseksi. Imurin moottorille tehtiin moottorinohjaus erilliseen laitekoteloon, johon asennettiin myös virranmittauslaitteet. Virtaa mitataan tässä kuvasta poiketen vain kahdesta vaiheesta. Testilaitte rakennettiin jämäkän vanerilavan päälle, jonka pohjaan kiinnitettiin renkaat siirtämisen helpottamiseksi. Purulaatikko ja puhallin kiinnitettiin lavaan ja muut komponentit kiinnitettiin niiden varaan (KUVA 15).



KUVIO 27. Testauslaitteiston kaavio.

Kiihtyvyyssanturi kiinnitettiin moottorin alustaan 4 mm ruuveilla. Moottorin kylkeen ja pätyyn liimattiin kaksi lämpötila-anturia ja yhdellä anturilla mitataan ympäristön lämpötilaa. Liimaamiseen käytettiin lämpöä johtavaa liimaa. Puhaltimen kehälle kiinnitettiin yksi paineanturiliuska ja kolme taipuma-anturia anturia, jotka suojattiin epoksiliimalla. Lisäksi puhaltimen alle laitettiin kiristimellä varustettu kiinnike teräsnauhalle. Teräsnauha näkyy kuvassa mustana puhaltimen kehän ympäri kiertävänä nauhana. Käytännössä tämä nauha on kuljetuslavoilla käytettävää terässinkilää. Puhaltimen runkoon kiinnitettiin metallilevy. Siihen asennettiin lineaaripotentiometri, johon kiinnitettiin nauhan toinen pää pituuden mittaamiseksi. Potentiometrin puoleiseen päähän kiinnitettiin lisäksi teräsnauhan kiristävät jouset. Potentiometri suojattiin alumiinikotelolla. Kaikkien anturien kaapelit varustettiin merkityillä liittimillä, jotta ne on helppo kytkeä mittalaitteeseen.

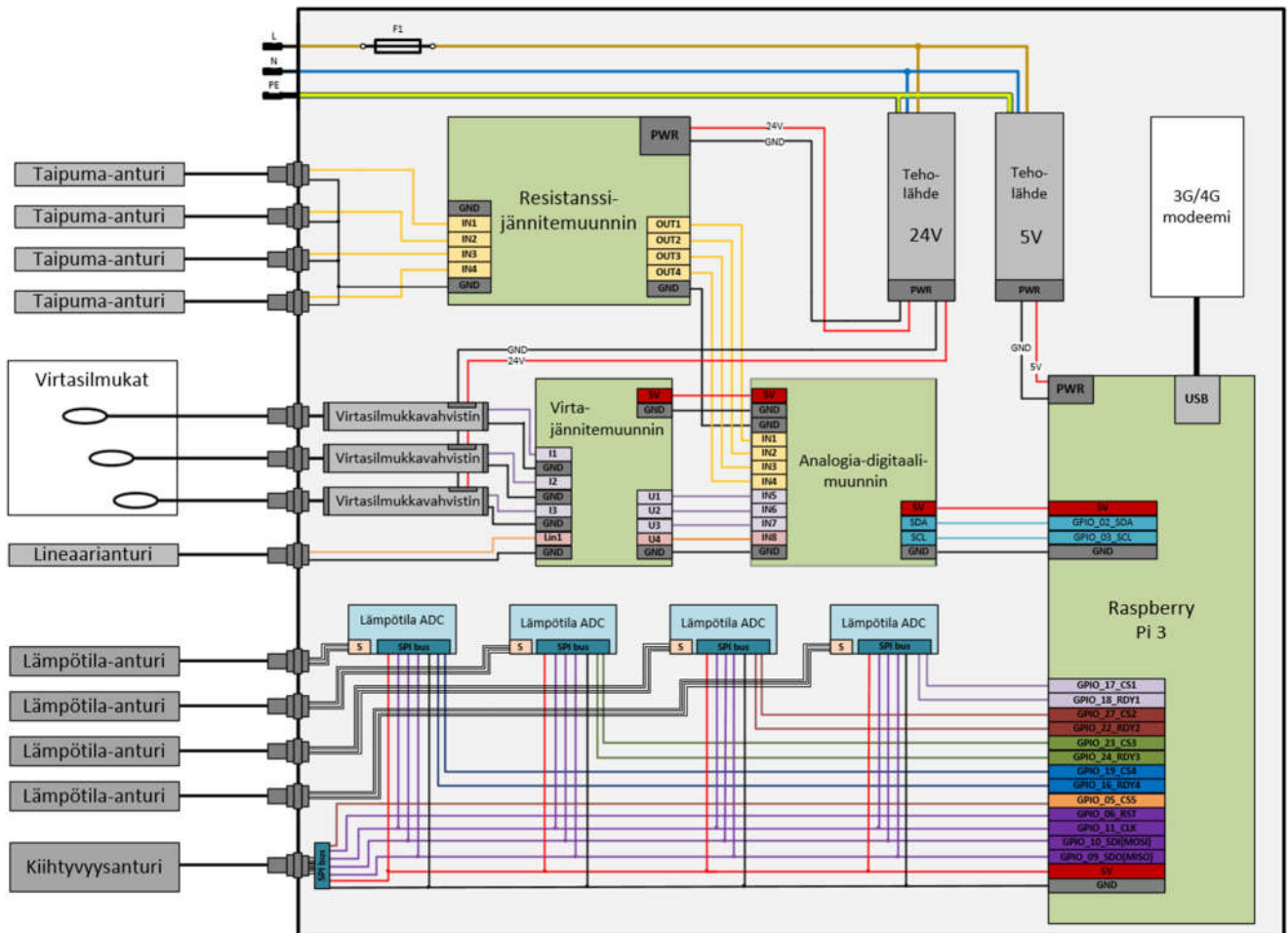


KUVA 15. Anturit kiinnitettynä laitteeseen testaamista varten.



KUVA 16. Mittalaite.

Mittalaite (KUVA 16) rakennettiin vedenpitävään koteloon, jotta se voitiin myöhemmin viedä Topi-Keittiöiden tehtaalle varsinaiseen mittaushuoneeseen. Mittalaite sisältää virtalähteet kaikille laitteille niin, että antureiden lisäksi siihen ei tarvitse liittää kuin yksi 230V tehon syöttö. Tiedonsiirtoa varten laitteeseen sisältyy 3G-modeemi, joka on liitetty Raspberryn USB porttiin. Vaihtoehtoisena liitännänä on Raspberryn ethernet-portti, jota käytettiin kehitystyössä. Mittalaitteen lohkokaavio on esitetty kuviossa 28.



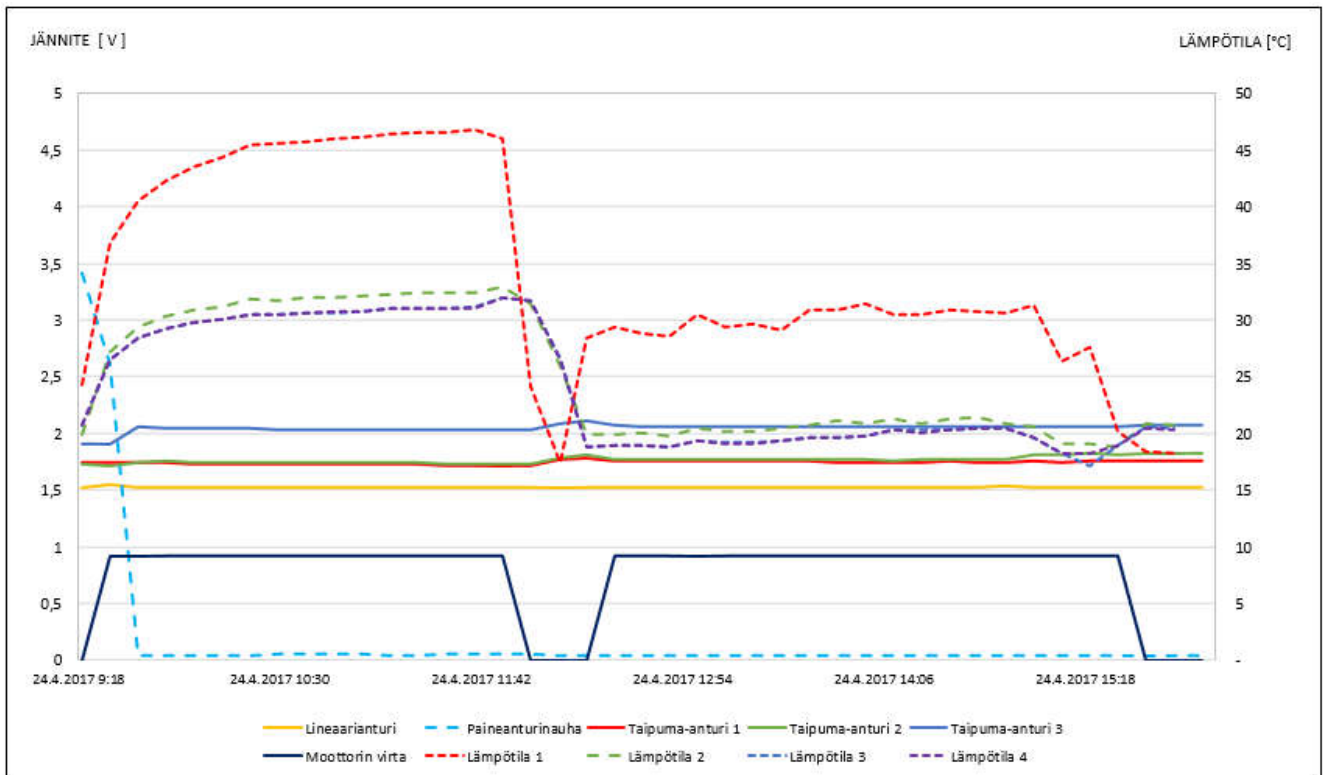
KUVIO 28. Mittalaitteen lohkokaavio.

### 3.3 Laitteiston testaus

Ensimmäistä testiä varten paineanturiliuskan nollapiste säädettiin noin 3,5 volttiin. Taipuma-antureiden nollapistet säädettiin hieman alle 2 volttiin. Meluhaittojen vuoksi testi oli tarkoitus suorittaa Centrian autotallissa, jonne laite siirrettiin. Mittalaitteeseen kytketään virrat ja sen jälkeen moottori käynnistettiin. Runsaan kahden tunnin jälkeen havaittiin, että imuri päästää purusta jauhautuvaa hienojakoista puupölyä talliin niin runsaasti, että testi jouduttiin keskeyttämään. Laite siirrettiin ulos ja käynnistettiin uudelleen.



Päivän päätteeksi laite sammutettiin ja siirrettiin takaisin talliin. Mittaustuloksista piirrettiin kuvaaja taulukkolaskentaohjelmalla (KUVIO 29).

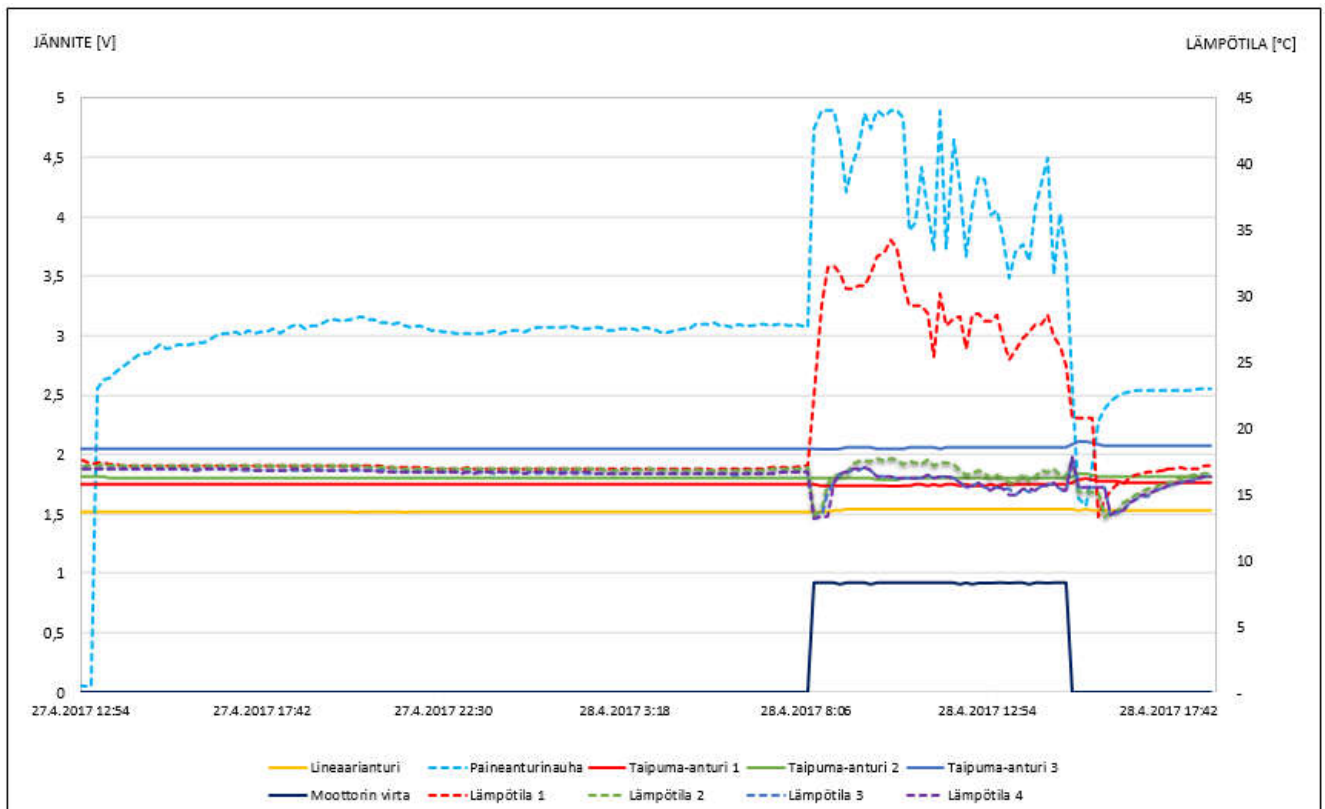


KUVIO 29. Testi 1:n tulokset.

Seuraamalla moottorin virtaa on helppo päätellä, milloin kone on ollut käynnissä. Lämpötila-anturi 1 mittaa puhaltimen kaavun pintalämpötilaa. Lämpötila-anturit 2 ja 3 mittaavat moottorin lämpötilaa ja lämpötila-anturi 4 ympäristön lämpötilaa. Havaittiin, että imuri lämpenee melko paljon. Ilmeisesti syynä on järjestelmässä suurella nopeudella virtaavan purun aiheuttama kitka. Moottori ei lämpene juuri ympäristöä kuumemmaksi. Paineanturinauha oli mennyt oikosulkuun pian moottorin käynnistämisen jälkeen. Taipuma-antureissa on havaittavissa pieniä muutoksia, mutta lineaarianturi ei ole reagoinut juuri mitenkään. Kun laite on siirretty ulos, vain imurin lämpötilassa näkyy merkittävä muutos käynnistämisen jälkeen. Taipuma-antureiden resistanssit jäivät lähtötilanteeseen nähden pysyvästi vähän koholle sammuttamisen jälkeen.

Paineanturinauha vaihdettiin uuteen ja sen nollassa säädettiin 2,5 volttiin. Anturin päälle levitettiin ohut kerros silikonimassaa. Seuraavana päivänä laitteisto siirrettiin jälleen ulos ja moottori käynnistettiin. Mittaustuloksista (KUVIO 30) nähdään, että paineanturin nollassa on vaeltanut säätämisen jälkeen yli 3 volttiin. Moottorin käynnistämisen jälkeen sen resistanssi on kasvanut äkisti. Näyttää siltä, että se

seuraa imurin lämpötilaa. Imurin lämpötila on aamulla korkeampi, koska silloin laite on auringon päisteessä. Kello 11 jälkeen se jää rakennuksen varjoon ja myöhemmin taivaalle kertyy pilviä, jolloin sää viilenee. Koska imurin halkaisija on suhteellisen pieni ja sitä kautta sen pinta kaareutuu melko jyrkästi, niin todennäköisesti imurin lämpölaajenemisella on iso vaikutus paineanturin resistanssiin. Toinen vaihtoehto on, että lämpötila vaikuttaa suoraan itse anturin ominaisuuksiin. Moottorin sammuttamisen jälkeen laitteen annettiin jäähtyä ulkona noin puoli tuntia, jonka jälkeen se siirrettiin jälleen sisätiloihin.



KUVIO 30. Testi 2:n tulokset.

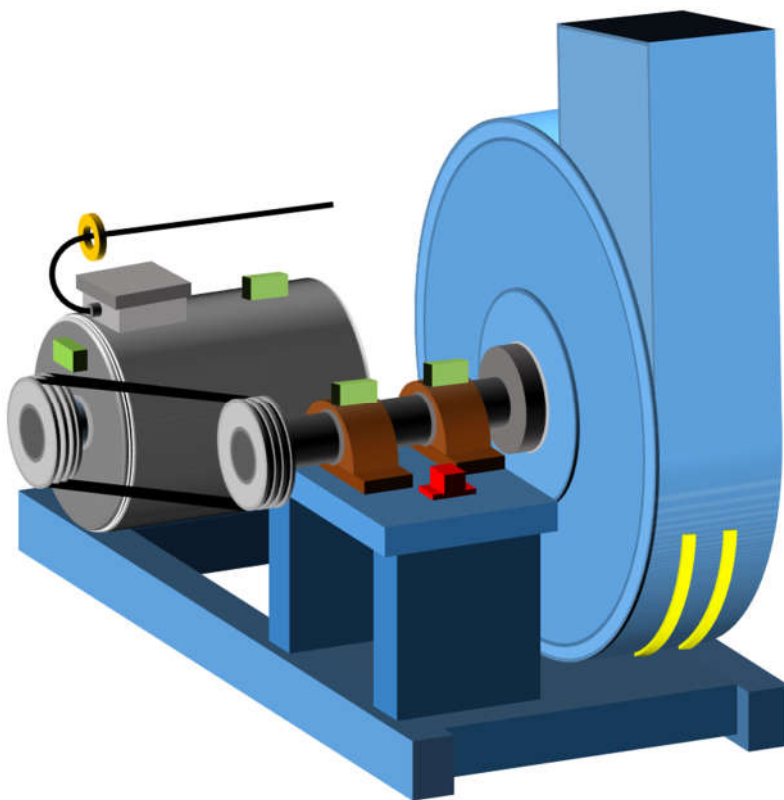
Mittaustulosten perusteella lineaarianturi ei toiminut ollenkaan tai se ei ollut tarpeeksi herkkä, ja se päätettiin hylätä. Sen rakenne on lisäksi liian monimutkainen asennettavaksi oikeaan kohteeseen. Taipuma-anturit eivät ole kovin herkkiä, mutta riittäisivät todennäköisesti havaitsemaan rikkoontumisen. Niitä tarvittaisiin kuitenkin kohtuuttoman paljon yhteen isompaan imuriin, joten niistäkin luovuttiin. Varsinaiseen testiin valittiin paineanturinauha. Oikean puruimurin halkaisija on paljon suurempi. Oletettiin, ettei lämpölaajeneminen vaikuttaisi paineanturiin niin paljoa kun mitattava pinta kaareutuu loivemmin. Tavoitteena oli saavuttaa riittävä mitta-alue säätämällä nollapiste alemmaksi ja vahvistus pienemmäksi. Lämpötilan ja virran mittaukset näyttävät toimineen hyvin.

## 4 KÄYTÄNNÖN TESTIT

Kun laitteiston toiminta saatiin todennettua ja käytännön testiin otettavat komponentit oli valittu, seuraava vaihe oli siirtää laitteisto varsinaiseen kohteeseen.

### 4.1 Laitteiston asennus Topi-Keittiöiden puruimuriin

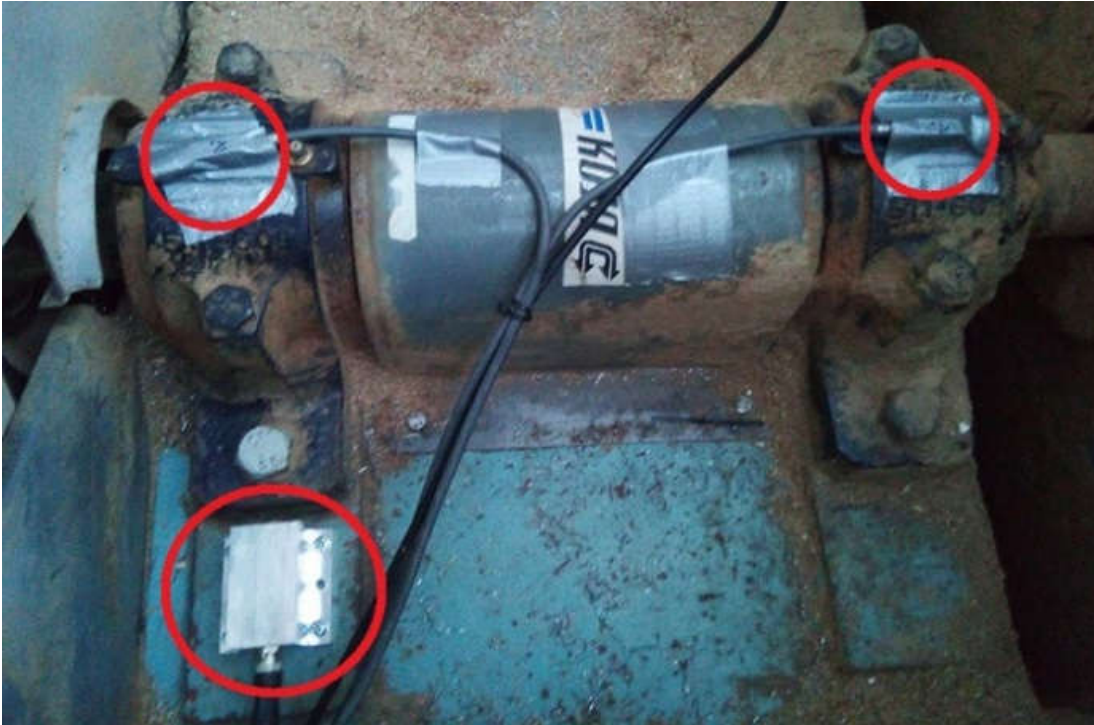
Topi keittiöiden tehtaalla oleva puruimuri on rakenteeltaan hieman erilainen kuin testissä käytetty laite. Puhaltimella on oma akseli, joka on laakeroitu kahdella laakerilla. Voimansiirto moottorilta akselille on toteutettu hihnoilla. Kuviossa 31 on esitetty periaate laitteen rakenteesta ja anturoinnista. Lämpötila-anturit on merkitty vihreällä. Kuten testilaitteessa, ne kiinnitettiin lämpöä johtavalla liimalla laakeripukkeihin ja moottoriin (KUVA 17 ja 18). Kiihtyvyyssanturi on merkitty punaisella (KUVA 17). Keltaisella merkityt taipuma-anturit kiinnitettiin puhaltimen kehälle antureissa olevalla kaksipuolisella teipillä (KUVA 19). Periaatekuvasta poiketen puhaltimen kaapuun asennettiin kolme nauhaa peräkkäin eikä rinnakkain. Koska laitteet sijaitsevat ulkona, ne suojattiin ohuella silikonikerroksella.



KUVIO 31. Periaatekuva Topi-keittiöiden puruimurin rakenteesta ja anturoinnista.



Lämpötila-antureiden päälle laitettiin ilmastointiteippi pitämään niitä paikoillaan liiman kuivumisen ajaksi. Kiihtyvyysanturi kiinnitettiin ruuveilla puhaltimen runkoon. Tätä varten runkoon porattiin tarvittavat reiät ja niihin tehtiin kierteet ruuveja varten.



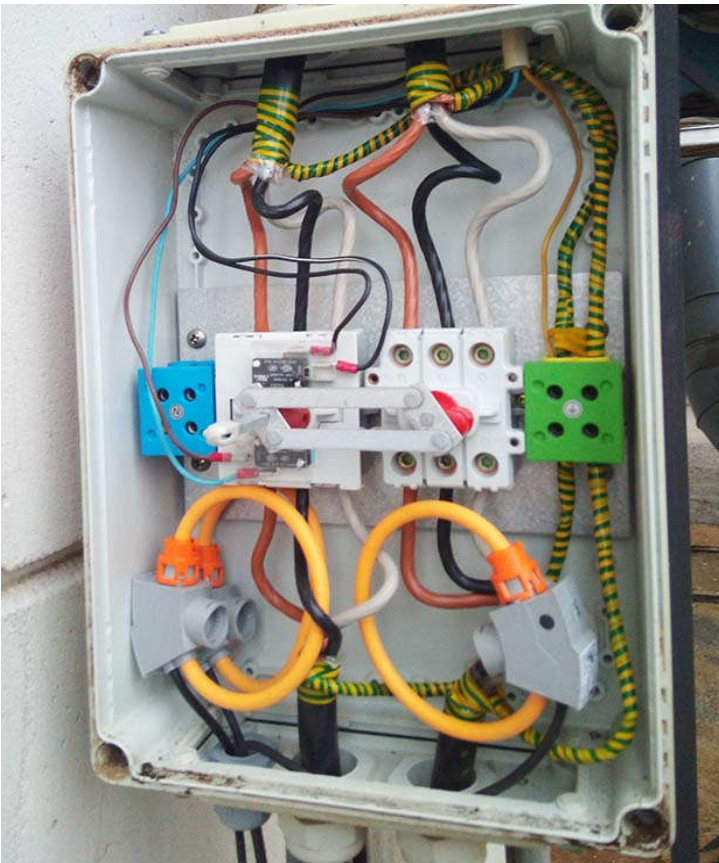
KUVA 17. Kiihtyvyysanturi (alimpana) ja laakereiden lämpötila-anturit.



KUVA 18. Moottorin lämpötila-anturit.



KUVA 19. Paineanturinauhaa imurin kaavussa.



KUVA 20. Virranmittausanturit moottorin turvakytinkotelossa.



Virranmittausanturit oli tarkoitus asentaa hallin sisällä sijaitsevaan sähkökeskukseen, josta moottorin syöttö tapahtuu ja vetää johdot sieltä mittalaitteelle. Oli kuitenkin yksinkertaisempaa asentaa anturit moottorin turvakytkimen koteloon (KUVA 20), joka on moottorin vieressä ulkona. Mittalaite kiinnitettiin tehdashallin ulkoseinään puruimurin läheisyyteen, jolloin antureille ei tarvinnut vetää pitkiä kaapeleita (KUVA 21). Aluksi harkittiin laitteen kiinnittämistä imurin runkoon, mutta sen tärinä olisi voinut aiheuttaa ongelmia mm. juotoksissa ja muissa liitoksissa.

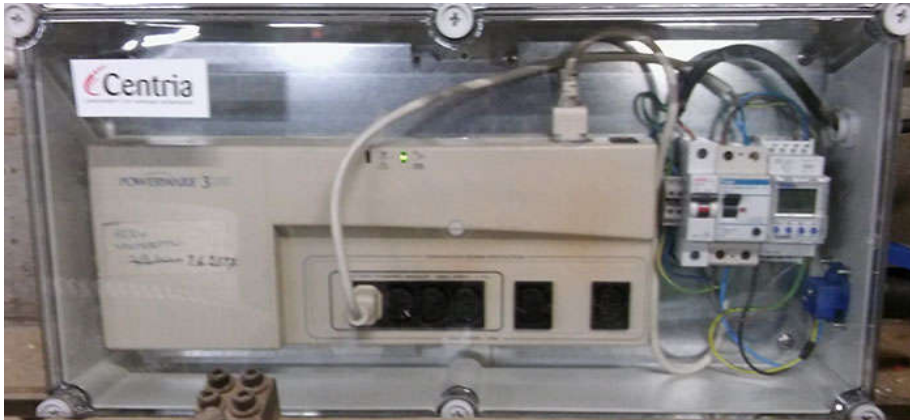


KUVA 21. Mittalaitteet asennettuna Topi-keittiöiden purunpoistojärjestelmään.

## 4.2 Muutokset

Asennusten jälkeen mittaus käynnistettiin. Jo parin päivän kuluttua havaittiin, että mittalaitteelta ei enää tule tietoa, eikä siihen saada etäyhteyttä. Todennäköiseksi syyksi epäiltiin häiriötä virransyötössä, joka olisi aiheuttanut Raspberry Pi:n ”kaatumisen”, sillä järjestelmään ei ollut sisällytetty varavirtalähdettä, kuten aluksi oli suunniteltu. Tässä vaiheessa sellainen päätettiin asentaa mittalaitteen verkkovirransyöttöön. Asentaminen virransyötön verkon puolelle ennen muuntajia oli helpompaa ja samalla mikään laitteen osa ei jää ilman sähköä sähkökatkoksen sattuessa. Varavirtalähteenä käytettiin pientä tietokoneille tarkoitettua Powerwaren UPS-laitetta, joka toimii samalla ylijännitesuojana esimerkiksi ukkosen aiheuttamia sähköverkosta tulevia jännitepiikkejä vastaan. Se asennettiin IP66 luokitettuun laitekoteloon. UPS-laitteelle tulevaan syöttöön asennettiin johdonsuojakytkin ja UPS-laitteelta mittalaitteelle lähtevään kaapeliin vikavirtasuoja.

UPS-laitteesta huolimatta aikaisemmin havaittu ongelma toistui taas parin päivän kuluttua. Ratkaisuksi mietittiin kytkentää, jossa Raspberry Pi:n virransyöttöön lisätään esimerkiksi digitaalisella ajastimella ohjattava kytkin. Raspberry Pi:n puolesta tehtäisiin ohjelma, joka tietyin aikavälein antaisi alustuskomennon ajastimelle. Jos komentoa ei tule asetetun ajan kuluessa, on laite jumiutunut ja ajastin katkaisisi virran hetkeksi.



KUVA 22. Mittalaitteen varavirtalähdkeysikkö varustettiin kellokytkimellä.

Yksinkertaisempaan ratkaisuun UPS-yksikön lähtöön lisättiin kellokytkin, joka katkaisee mittalaitteen virransyötön joka yö minuutin ajaksi (KUVA 22). Tällöin laitteisto käynnistyy uudelleen vuorokauden välein, eikä pitkiä katkoksia toiminnassa pääse tulemaan. Tämä on osoittautunut toimivaksi ratkaisuksi. Mittauksessa ei havaittu enää katkoksia testijakson aikana. Ilmeisesti ongelma oli Raspberry Pi:n tai 3G-modeemin toiminnassa ja ilmenee silloin, kun laite on käynnissä yhtäjaksoisesti pidemmän ajan.

### 4.3 Laitteiston kustannukset

Taulukkoon 1 on koottu mittalaitteistossa käytettyjen komponenttien ja laitteiden hintoja. Komponentit on jaettu ryhmiin mitattavien suureiden mukaan. Mittalaite käsittää koko järjestelmälle yhteisen keskusyksikön. Myöhemmin järjestelmään lisätyn varavirtajärjestelmän komponentteja ei ole mainittu tässä taulukossa. Virtamittaussilmukat vahvistimiseen olivat jo olemassa eikä niitä tarvinnut hankkia. Niiden hinta on suuntaa antava. Tarvikkeiden hinta on arvio, sillä erilaisia kaapeleita, ruuveja, liittimiä, ja muuta vastaavaa käytettiin asennusten eri vaiheissa, eikä niiden määrää seurattu tarkasti.

TAULUKKO 1. Laitteiden hinnat

Komponentti	á-hinta [€]	määrä [kp]	yhteensä [€]
<i>Mittalaite:</i>			
Laitekotelo	56	1	56
Teräspaneeli	10	1	10
Raspberry pi 3	35	1	35
ADC-muunnin	20	1	20
5V teholähde	24	1	24
24V teholähde	34	1	34
3G-modeemi	40	1	40
<i>Verymän mittaus:</i>			
Paineanturiliuska	16	3	48
Operaatiovahvistin	3	1	3
Trimmeri	2	8	16
Liittimet	11	4	44
<i>Lämpötilan mittaus:</i>			
PT100-vahvistin	15	4	60
PT100-anturi	15	4	60
<i>Virran mittaus:</i>			
Virtamuuntajat	290	3	870
<i>Muuta:</i>			
Kaapeleita, liittimiä, tarvikkeita, yms.			300
<b>Yhteensä</b>			<b>1600</b>

#### 4.4 Tulokset

Kiihtyvyysanturia lukuun ottamatta kaikkien antureiden mittaustulokset koko mittausjaksolta ovat liitteenä. Moottorivirran kuvaaja on alimmaisena jokaisella lämpötilakuvaajan liitesivulla vertailun helpottamiseksi. Lämpötilaerot on laskettu yksinkertaisesti vähentämällä kunkin mittapisteen lämpötilasta ulkoilman lämpötila. Kun kone ei ole ollut käynnissä, ja ulkoilma lämpenee laitteita nopeammin, lämpötilaero saa hetkittäin negatiivisen arvon. Kuten testilaitteen tapauksessakin, kuvaajaan on sisällytetty ainoastaan 1. vaiheen virta, sillä kaikkien vaiheiden virrat ovat tarkastelujaksolla melko tarkasti yhtä suuria, noin 30A moottorin käydessä. Virran kuvaajasta nähdään selvästi puhaltimen päällä olo. Tarkasteltaessa moottorin virtaa havaitaan, että virrassa on hetkittäisiä suuriakin muutoksia, mutta merkittävää kasvua kokonaiskulutuksessa ei tapahdu.

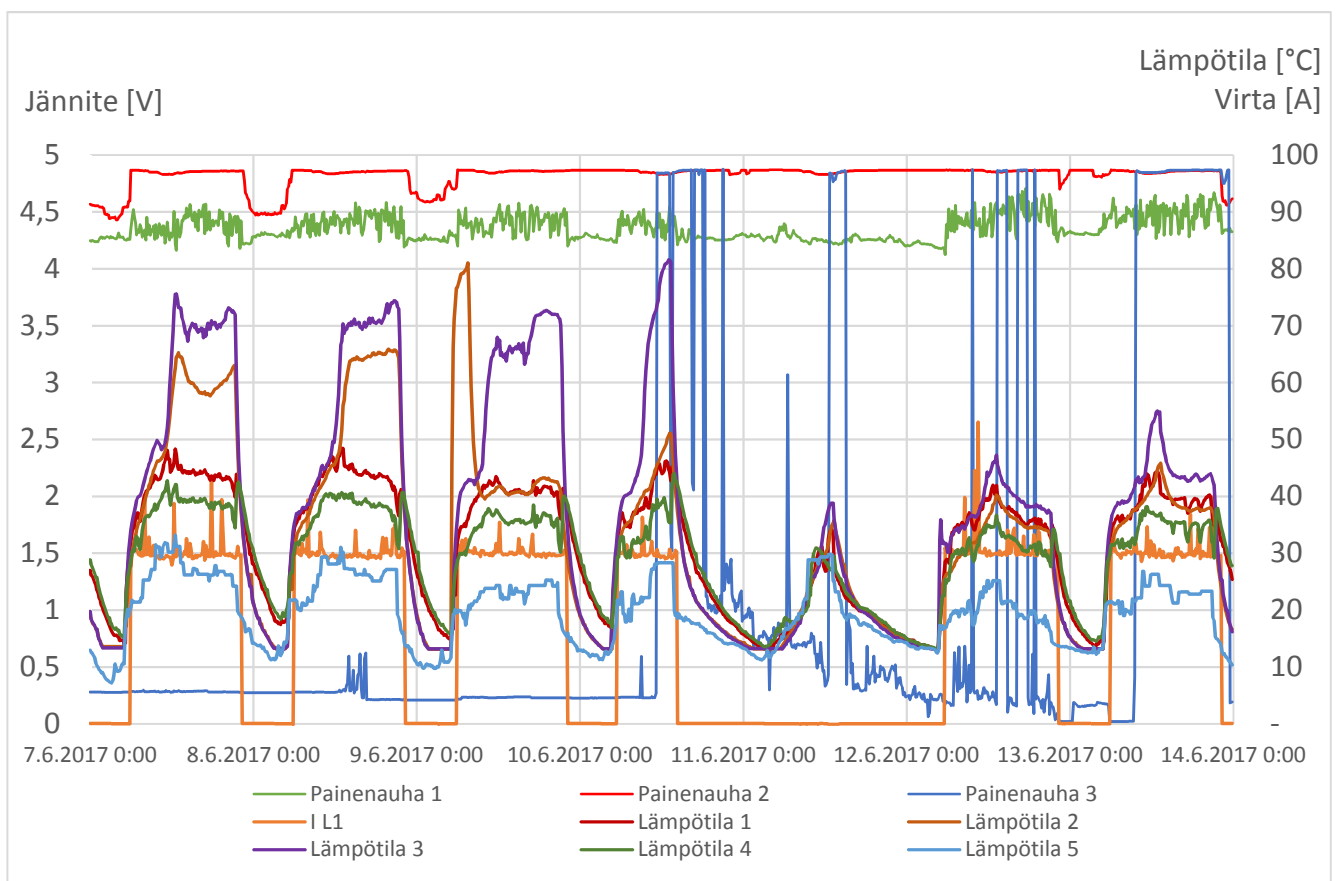
Ulkolämpötila-anturi näyttää yllättävän korkeita arvoja, sillä ilmeisesti aurinko lämmittää anturia suoraan tai sitten sen ympäristöä. Tämä on nähtävissä erityisen hyvin viikonloppuna, kun kone ei päivän aikana ole käynnissä, mutta kaikkien anturien lämpötilat nousevat päivällä yli 30°C. Koska puruimuri sijaitsee lähellä hallin seinää muun laitteiston katveessa, viileänäkään päivänä moottorin lämpö ei ilmeisesti tuuletu koneen ympäristöstä kovin tehokkaasti.

Ympäristön lämpötila näyttää nousevan välittömästi moottorin lämmitessä, kun se käynnistetään aamulla klo 6.00, milloin auringonpaiste ei voi vielä vaikuttaa asiaan. Moottorin lämpötilat jakautuvat epätasaisesti. Moottorin etu-, eli akselin puoleisen pään lämpötila nousee päivän aikana usein hyvinkin korkealle, yli 70°C. Taaempana moottorin päällä olevan anturin lukema nousee noin 40°C. Looginen selitys tälle on moottorin takapäessä sijaitseva tuuletin, joka jäähdyttää sitä tehokkaasti. Pidemmällä tarkastelujaksolla voidaan havaita, että ensimmäisen 2-3 viikon aikana moottorin etupää käy huomattavan lämpimänä, yli 50°C ulkoilman lämpötilan (LIITE 1/5). Myöhemmin se lämpenee noin 25°C ulkoilmaa lämpimämmäksi käytön aikana. Moottorin takapään lämpeneminen toistuu työpäivinä aina suunnilleen samanlaisena (LIITE 2/5).

Puruimurin laakereiden lämpeneminen etenee erikoisella tavalla. Lähempänä moottoria sijaitseva laakeri näyttää lämpenevän reilusti toista enemmän. Kuvaajassa 3 näkyy, kuinka kesäkuun kymmenentenä päivänä se on aluksi lämmennyt moottoriakin enemmän. Koska laakereiden kuntoa ei tunneta, on vaikea sanoa, johtuuko tämä laakerin kulumisesta, epäsymmetrisestä kuormituksesta vai molemmista. Aluksi ajateltiin, että kyseisenä aamuna imurin läpi olisi ajettu poikkeuksellisen suuri määrä purua ja laakeri

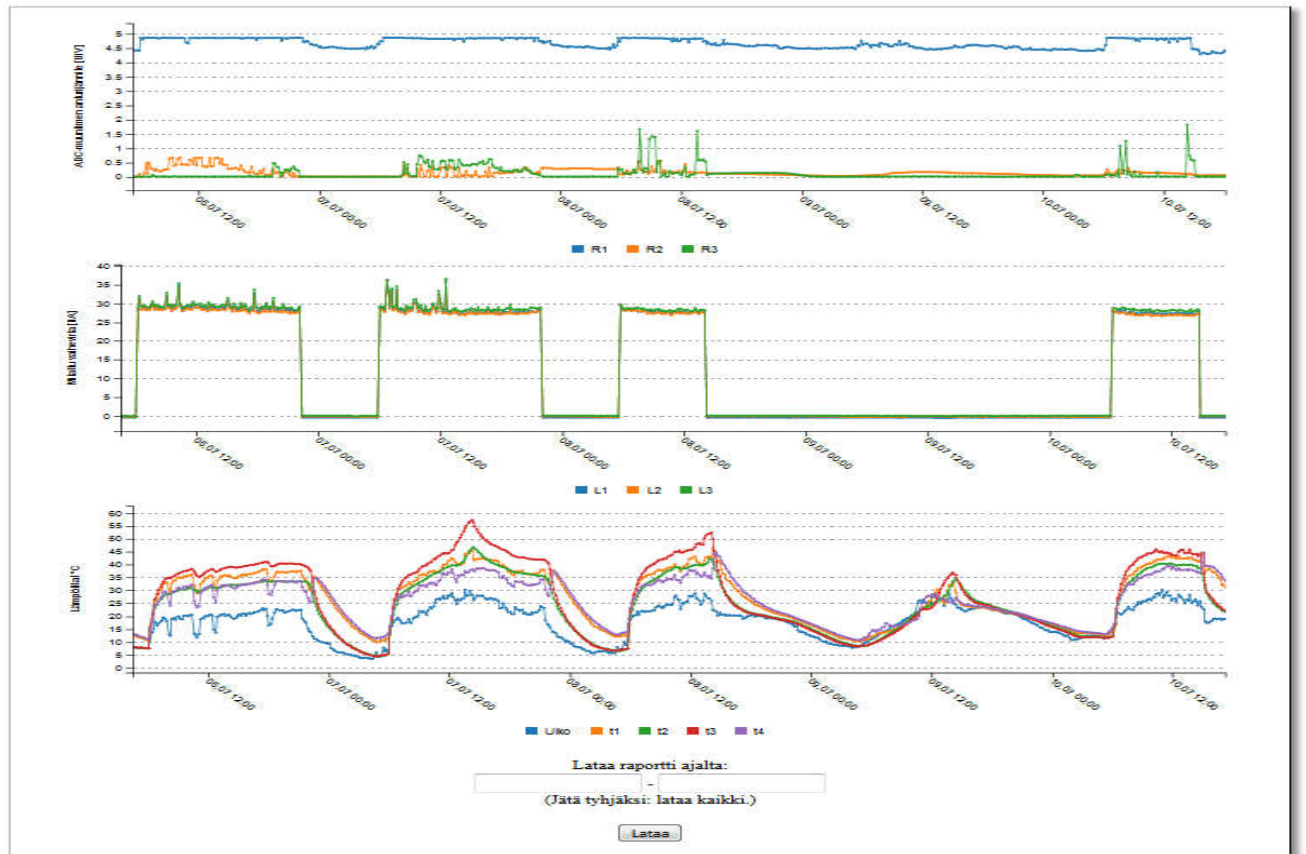
sen vuoksi kuormittunut tavallista enemmän. Laakereiden epäsymmetrinen lämpeneminen voisi johtua akselin moottorin puoleisessa päässä olevasta hihnasta, joka kuormittaisi ko. laakeria toista enemmän. Pidemmän ajan kuvaajassa (LIITE 3/5) tämä näkyy kuitenkin vain lähinnä yhden viikon poikkeamana. Imurin puoleisessa laakerissa poikkeamaa ei näy (LIITE 4/5).

Painenauhojen signaali on kääntäen verrannollinen nauhoihin kohdistuvaan paineeseen. Kuviossa 32 on mittaustuloksia noin viikon ajalta. Siinä näkyviä mittaustuloksia tarkasteltaessa havaitaan painenauha 2:n signaalin olevan enimmäkseen saturoitunut. Tämän arveltiin johtuvan vahvistimen säätövaran loppumisesta. Signaalin perusteella nauhaan ei kohdistu suurta painetta. Painenauha 1 pysyy mittausalueella. Painenauha 3:n näyttäisi kohdistuvan suurempi paine. Lopulta signaalin vaihtelut ääriarvoista toiseen ovat niin äkillisiä, että nauhan tai sen ja kaapelin välisen liitoksen arveltiin todennäköisesti vioittuneen. Painenauhojen data koko mittausjaksolta on liitteessä (LIITE 5/5).



KUVIO 32. Puruimurin mittausdataa tietokannasta 7.6. – 14.6.2017

Yllä mainitut kuvaajat on tehty taulukkolaskentaohjelmalla tietokannasta kerättyjen tietojen pohjalta. Antureiden tietoja oli mahdollista tarkastella myös www-selaimen avulla (KUVIO 33).



KUVIO 33. Puruimurin mittausdataa 6.7 – 10.7, web-käyttöliittymästä tarkasteltuna

Kiihtyvyyssanturin tiedot kerättiin erilliseen tietokantaan, mutta anturin toiminnassa tapahtuneen häiriön takia anturilta saatu data oli korruptoitunut. Mittausten aikana vian syytä ei saatu selville, mutta mitta-laitteistoa purettaessa syyksi paljastui juotosvika kiihtyvyyssanturin liittimessä.



## 5 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Työn aikana rakennettiin kunnonvalvontaa varten mittauslaitteisto, jonka toimintaa testattiin ensin Centrian tiloissa. Laitteessa sovellettiin joitakin antureita, kuten paineanturiliuskoja, uudella tavalla. Testausvaiheessa selkeästi huonot vaihtoehdot karsittiin pois ennen kuin järjestelmä asennettiin valvottavaan koneeseen. Siitä huolimatta vastoinikäymisiltä ei välttytty ja laitteistoon oli tehtävä muutoksia ja korjauksia mittausjakson aikana.

Aluksi esimerkiksi tiedonsiirto katkesi. Syy oli todennäköisimmin joko Raspberry Pi tai sitten tiedonsiirrosta käytetty 3G-modeemi. Modeemin voisi korvata kiinteällä internetyhteydellä, jotta vian syy saadaan rajattua vähän tarkemmin. Mittauskohteessa kiinteää yhteyttä ei kuitenkaan ollut käytettävissä, eikä laboratoriotesteissä vikaa ilmennyt, joten syy jäi toistaiseksi epäselväksi.

Kerätyn datan perusteella parhaiten toimivat virta- ja lämpömittarit. Lämpötilaa seuraamalla olisi kohtuullisen helppoa arvioida esimerkiksi laakerien vaihtotarvetta. Kuitenkin, laakerin lämpötilan noustessa vaurio on jo kehittynyt hyvin pitkälle. Lämpötilamittauksen vertailutason antavan ulkolämpötilaa mittaavan anturin sijainti pitäisi miettiä tarkemmin, jotta esimerkiksi koneen jäähdytysilman vaikutus ei vääristä mittaustuloksia.

Mittausjakson aikana venymämittausta suorittavien antureiden resistanssit vaihtelivat niin paljon, ettei laite enää kyennyt mittaamaan niitä kunnolla. Joko anturit vaurioituivat, tai sitten laitteen mittausalue vain loppui kesken. Jälkeenpäin ajatellen antureiden kunnon olisi voinut tarkistaa yksinkertaisesti mittaamalla resistanssin yleismittarilla. Tarvittaessa antureiden resistanssia mittaavasta piirikortista olisi voinut tehdä kaksoiskappaleen, jonka mittausalue on laajempi, ja vaihtaa sen alkuperäisen kortin tilalle. Kortin vaihtaminen ei olisi ollut kovin vaikeaa ja laajemmalla mittausalueella olisi ehkä saatu selville mitä antureille tapahtui. Viimeistään ennen antureiden irrottamista niiden resistanssit olisi ollut hyvä tarkistaa. Joka tapauksessa venymämittaus ainakaan tässä tapauksessa käytetyillä antureilla ei ole toimiva ratkaisu. Antureiden asentaminen on liian työlästä ja ne ovat alttiita vaurioitumiselle. Tämä ilmeni kyllä jo laboratoriotesteissäkin.

Värähtelymittaukset kunnonseurannassa on laaja osa-alue, eikä siihen tässä ollut mahdollista perehtyä kovin syvällisesti. Juotosvian takia kiihtyvyysanturin mittaus ei toiminut testijakson aikana, joten sen toiminnasta ei saatu tietoa. Koneen runkoon kiinnitetyn yhden anturin perusteella on todennäköisesti hankala tehdä kovin tarkkoja päätelmiä laakereiden kunnosta, mutta olisi silti ollut mielenkiintoista

nähdä miten se toimii. Erillisillä kiihtyvyysantureilla suoraan laakeria vasten asennettuna saataisiin kuitenkin todennäköisesti paras tieto laakereiden kunnosta. Toteutus olisi ollut järkevämpää tehdä valmiilla kunnonvalvontaan tarkoitetuilla kiihtyvyysantureilla, eikä rakentaa anturia komponenteista.

Mittausjakso oli melko lyhyt seurattavan laitteen käyttöikää ajatellen. Tämän takia mittausdataa ei kertynyt kovin paljon, eikä sen perusteella pystytä arvioimaan kunnolla mittausten toimivuutta ja luotettavuutta. Laitteistolla tehtävä kunnonvalvonta perustuisi mitattujen tulosten vertaamiseen aikaisempiin tuloksiin, eli toisin sanoen koneen käyttäytymisessä tapahtuviin muutoksiin. Jotta esimerkiksi moottorissa olevan laakerin kulumisen ja vaihtotarve voitaisiin ennakoida niin dataa pitäisi kerätä ainakin yhden laakerin käyttöiän verran aina laakerin särkymiseen asti. Muuten vaikkapa laakerin lämpötilassa tapahtuvasta muutoksesta on vaikea päätellä luotettavasti, onko se oikeasti vikaantumassa vai vain koneen normaalista toiminnasta johtuvaa. Sama pätee myös muihin koneen osiin. Moottorin virrassa on hetkittäisiä vaihteluita jotka johtuvat kuormituksen muutoksista. Testijakson ajalta ei ole havaittavissa selvää muutosta keskimääräisessä toiminnassa ja siitä voidaan päätellä, että kone on toiminut normaalisti sinä aikana.

Tämän työn perusteella virta- ja lämpötilamittaukset voivat oikein käytettynä olla hyvä keino moottorien ja laakereiden kunnonseurantaan. Komponenttikustannukset eivät ole mahdottoman suuria, vaikka niillä kattaisi useampiakin kriittisiä kohteita ja tämän tapaisessa mittauksessa analysoitavaa dataa ei tule kovin suuria määriä. Virtaa ei tarvitse välttämättä mitata kaikista vaihejohtimista jolloin virtasilmukoiden määrää voidaan vähentää. On kuitenkin huomioitava, että vaikka anturit olivatkin pääasiassa kaupallisia tuotteita, niin niiltä tulevien signaalien mittaamiseen käytetty laite ei ole. Jos käytetään jotain valmista kaupallista mittalaitetta niin järjestelmän kokonaishinta kasvaa huomattavasti. Tiedonsiirto, tallennus tietokantaan ja analysointi ovat vielä oma lukunsa. Valmiita kunnonseurantajärjestelmiä toimittavien tahojen tuotteisiin kuuluu yleensä palvelu, joilla mittausdataa kerätään ja analysoidaan.

Työn lopputulos ei yltänyt ainakaan omien ennakko-odotusteni tasolle. Mittausten perusasioihin olisi voinut perehtyä vielä paremmin ja harkita tarkemmin käytettäviä menetelmiä. Työn kirjallisen osuuden viimeistelykin venyi aikataulusta liian paljon. Saatuja tuloksia on kuitenkin hyödynnetty osana hankkeen muita osa-alueita mm. demonstraatioissa. Kokonaisuutena työn tekeminen oli kuitenkin mielenkiintoista ja vaikka suuri osa tekniikasta oli jo tuttua työni kautta, opin taas uusia asioita.

## LÄHTEET

ABB Oy. 2000. ABB TTT-käsikirja. 9. painos. Vaasa.

ABB Automation Group Ltd. 2001. Tekninen opas nro 7.

AB Electronics UK. ADC Pi Plus. Saatavissa: <https://www.abelectronics.co.uk/p/56/ADC-Pi-Plus-Raspberry-Pi-Analogue-to-Digital-converter>. Viitattu 19.6.2017.

AB Electronics UK. ADC Pi Plus Schematic. Saatavissa: <https://www.abelectronics.co.uk/docs/stock/raspberrypi/adcpplus/adc-pi-plus-schematic.pdf>. Viitattu 19.5.2017.

Adafruit. Adafruit MAX31865 RTD PT100 Amplifier. Saatavissa: <https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/>. Viitattu 24.5.2017.

Adams, J. 2014. Introducing Raspberry Pi HATs. Saatavissa: <https://www.raspberrypi.org/blog/introducing-raspberry-pi-hats/>. Viitattu 12.4.2017.

Analog Devices. 2012. Digital Triaxial Vibration Sensor with FFT Analysis and Storage. Data Sheet ADIS16227. Rev B. Saatavissa: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16227.pdf>. Viitattu 10.3.2017.

Automation24. PT100 bolt-on WIKA 14132815 - TF45 PT100/A/4-L/8X8MM/200°C/2.0M. Saatavissa: <http://www.automation24.com/process-sensors/pt100-bolt-on-wika-14132815-tf45-pt100/a/4-l/8x8mm/200c/20m-i51-2721-0.htm>. Viitattu 2.4.2017.

Interlink Electronics. Force Sensing Resistors. FSR 400 Series Data Sheet. Rev. D. Saatavissa: [http://interlinkelectronics.com/datasheets/Datasheet\\_FSR.pdf](http://interlinkelectronics.com/datasheets/Datasheet_FSR.pdf). Viitattu

Maxim Integrated 2010. Single/Dual/Triple/Quad Operational Amplifiers. ICL761X-ICL764X Data Sheet. Rev. 3. Saatavissa: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/ICL7611-ICL764X.pdf>. Viitattu 4.4.2017.

Maxim Integrated. 2015. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Data Sheet DS18B20. Rev 4. Saatavissa: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Viitattu 16.5.2017.

Microsoft. Raspberry Pi 2 & 3 Pin Mappings. Saatavissa: <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/iot/docs/pinmappingsrpi>. Viitattu 27.6.2017.

Midori America Corporation. 2014. Conductive Plastic Linear Sensor. LP-50F Series. Saatavissa: <http://www.midoriamerica.com/cmsdesigner/dlfile.php?entryname=products&entryid=00025&fileid=00000007&/LP-50F.pdf>. Viitattu 9.5.2017.

Mikkonen, H., Miettinen, J. & Jantunen, E. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. 1. painos. Helsinki: KP-Media Oy.

MIP Electronics Oy. Kunnanvalvonnan sovelluksia. Saatavissa: <http://www.mip.fi/cms/fi/sovellukset/kunnanvalvonta>. Viitattu 14.7.2017.

ModMyPi. UPS Pico – Uninterruptible Power Supply & I2C Control HAT. Saatavissa: <https://www.modmypi.com/raspberry-pi/breakout-boards/pi-modules/ups-pico>. Viitattu 2.6.2017.

Phoenix Contact. 2016. Configurable current transformer for retrofitting. PACT RCP-4000A-UIRO-Dxxx. Datasheet. 106844\_en\_01. Saatavissa: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/us?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2906235&library=usen&pdfmode=direct&pdflanguage=en>. Viitattu 1.5.2017.

PSK 7712. 2000. PSK Standardisointiyhdistys ry.

Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi 3 Model B. Saatavissa: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. Viitattu 12.4.2017.

Raspberry Pi Foundation. Introduction. What Is a Raspberry Pi? Saatavissa: <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/#introWhatIs>. Viitattu 25.3.2017.

Spectra Symbol 2014. Flex Sensor FS. Flex Sensor Data Sheet. Rev. A. Saatavissa: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/FLEXSENSORREVA1.pdf>. Viitattu 28.4.2017.

Valtanen, E. 2013. Tekniikan taulukkokirja. 20. painos. Genesis kirjat Oy.

WIKA Instrument, 2010. Electrical temperature measurement. OEM insertion thermometer with connecting lead Model TF45. Data Sheet TE 67.15. Saatavissa: [http://www.wika.us/upload/DS\\_TE6715\\_GB\\_13624.pdf](http://www.wika.us/upload/DS_TE6715_GB_13624.pdf). Viitattu 2.5.2017.

